

# 电机学

## 同步电机基本电磁关系

东南大学电气工程学院  
黄允凯



东南大学  
电气工程学院

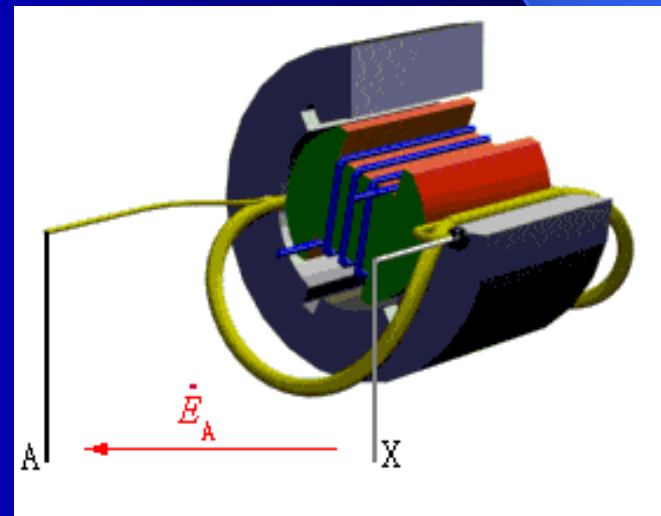
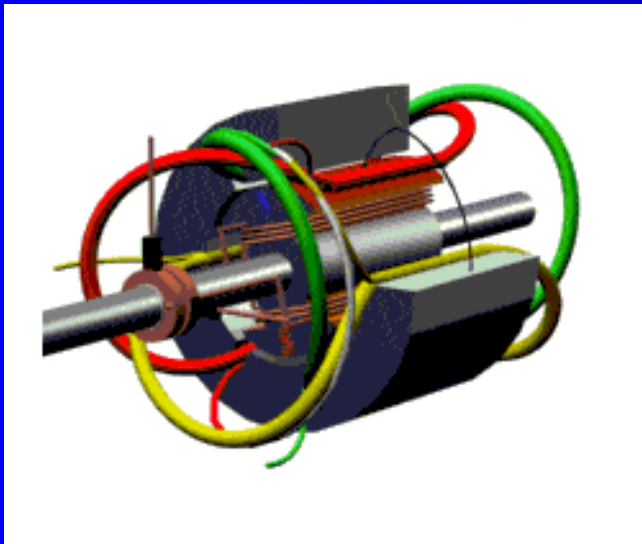
# 同步电机基本电磁关系

## 主要内容：

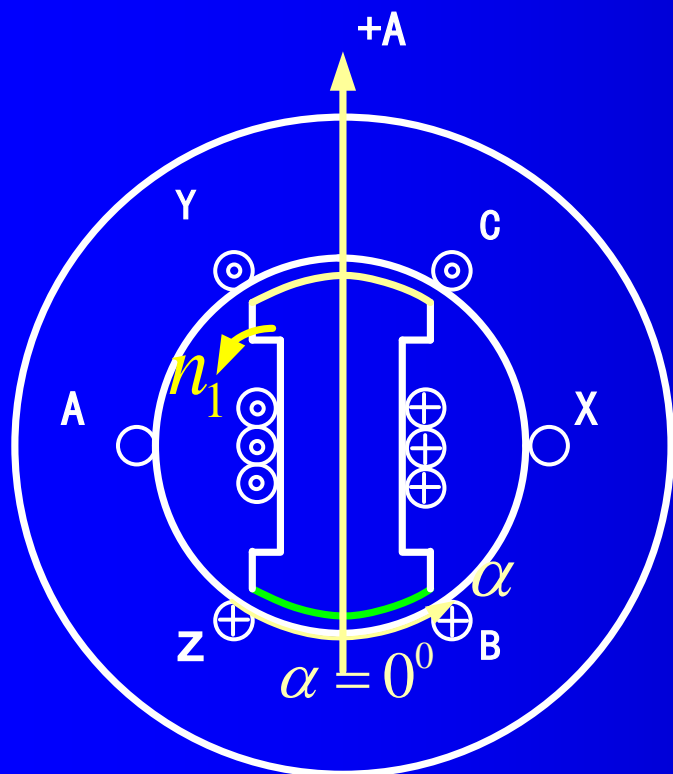
- 1) 空载运行（转子励磁磁场单独存在）分析，时空相-矢量图
- 2) 电枢反应：电枢磁场对励磁磁场的影响
- 3) 隐极式与凸极式同步发电机的电动势相量图、方程式、等值电路

# 同步发电机空载运行

**空载运行：**当原动机带动发电机在同步转速下运行，励磁绕组流过适当的直流励磁电流，电枢绕组不带任何负载时的运行情况。



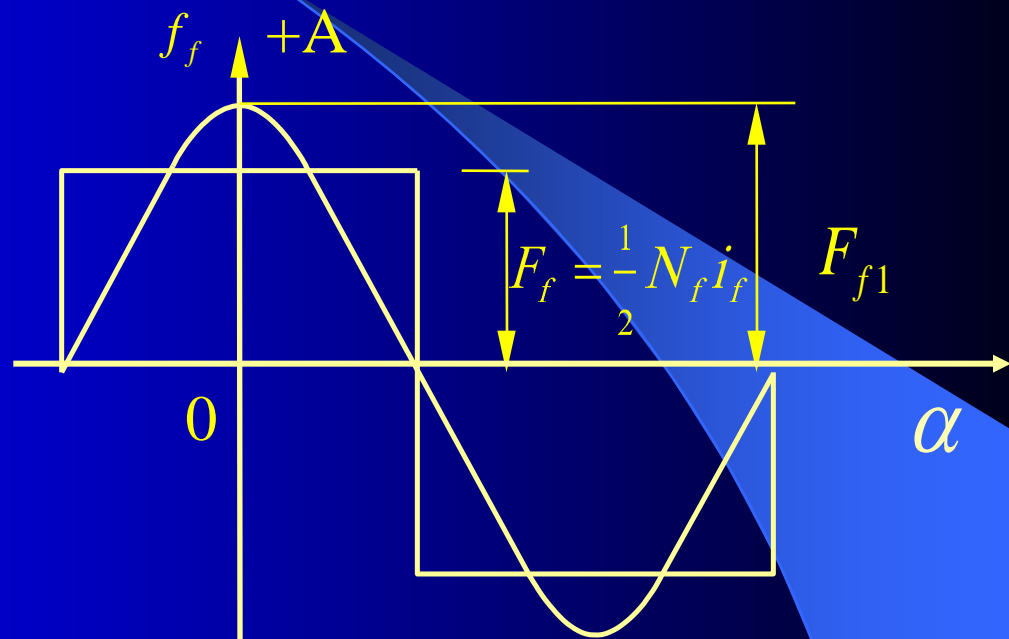
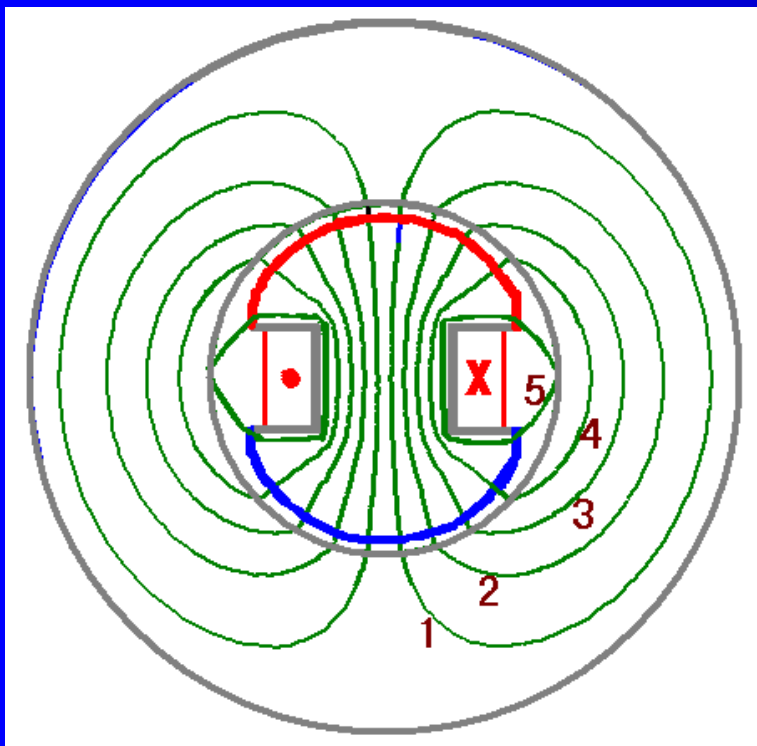
# 1 基波励磁磁动势



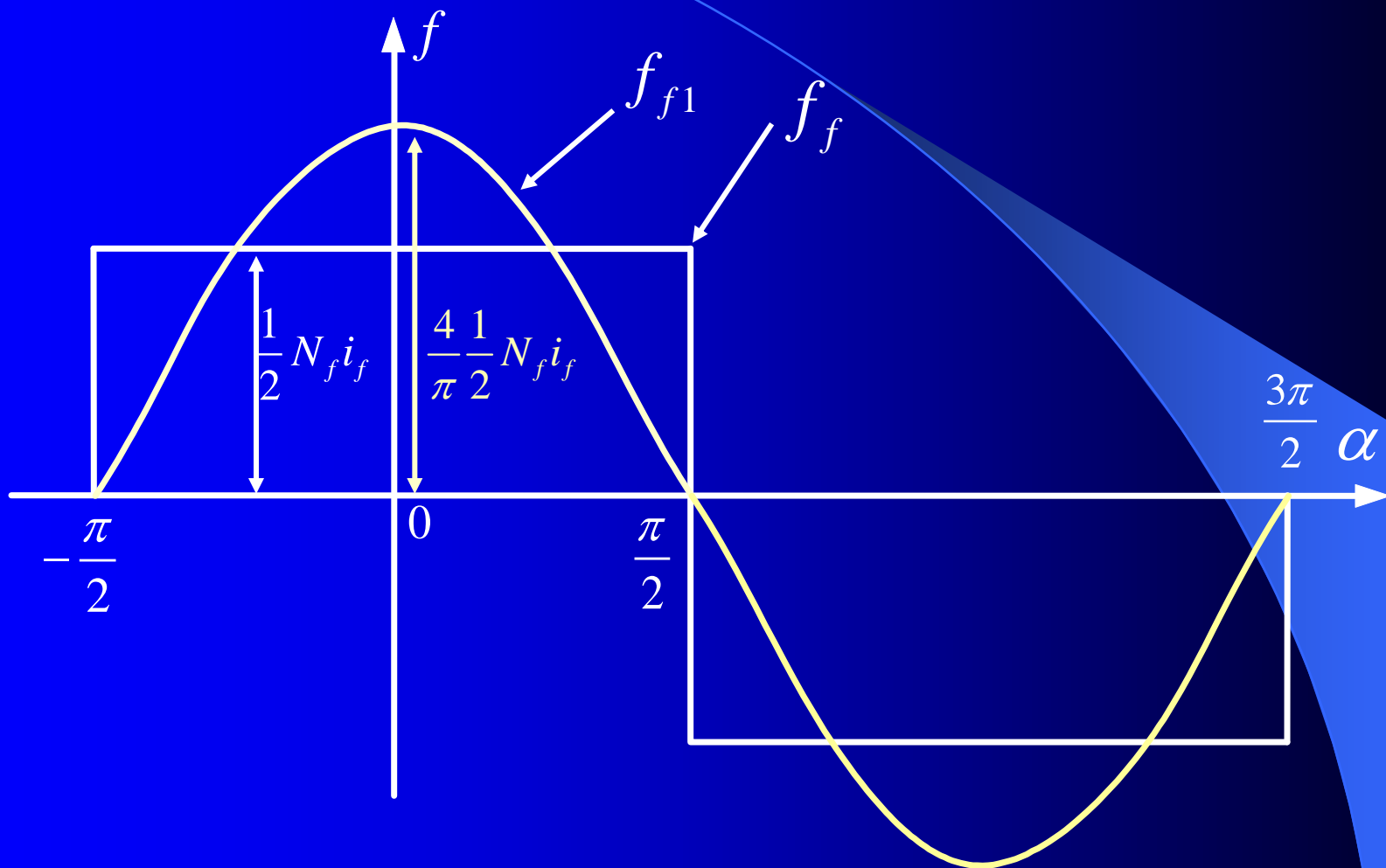
当励磁绕组中通入直流励磁电流后，转子磁极形成固定N、S极的电磁铁，随着转子一起旋转。随转子一起旋转的磁动势，称为励磁磁动势。

电枢绕组中的感应电势称为空载感应电势 $E_0$ ，由励磁磁动势决定，由于励磁磁动势都不是正弦波，那主要由基波分量决定。为此，首先了解励磁磁动势的分布波形，及如何求出基波分量

# 1) 凸极矩形波磁势



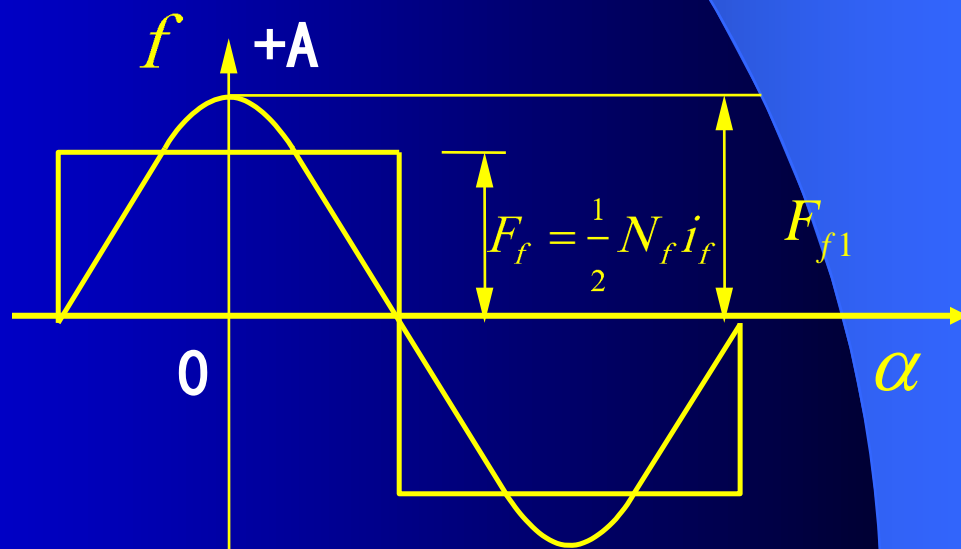
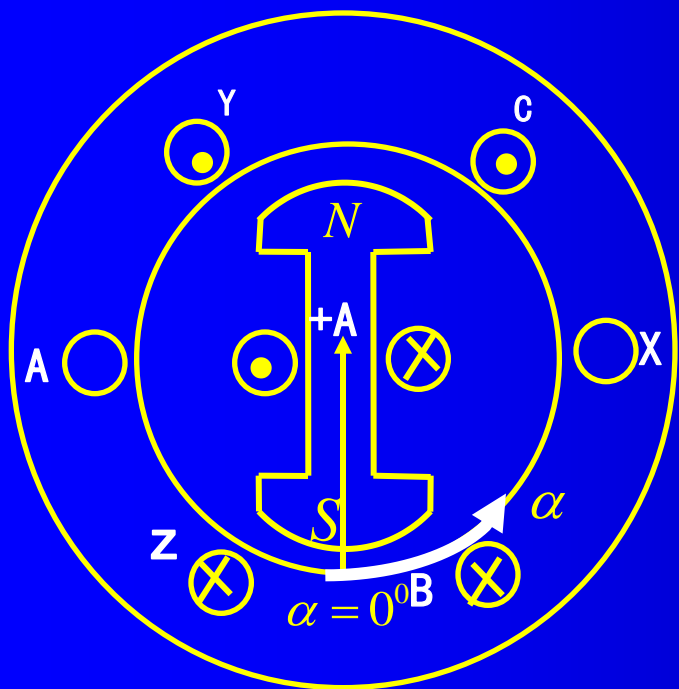
对比闭合回路1-5的气隙磁势：  
彼此相等！（忽略铁心磁压降）



每个磁极所产生的磁动势波是幅值为  $\frac{N_f i_f}{2}$  的矩形分布波，利用级数展开得到基波和谐波，<sup>2</sup> 基波幅值为：  

$$F_{f1} = \frac{4}{\pi} F_f = k_f F_f$$

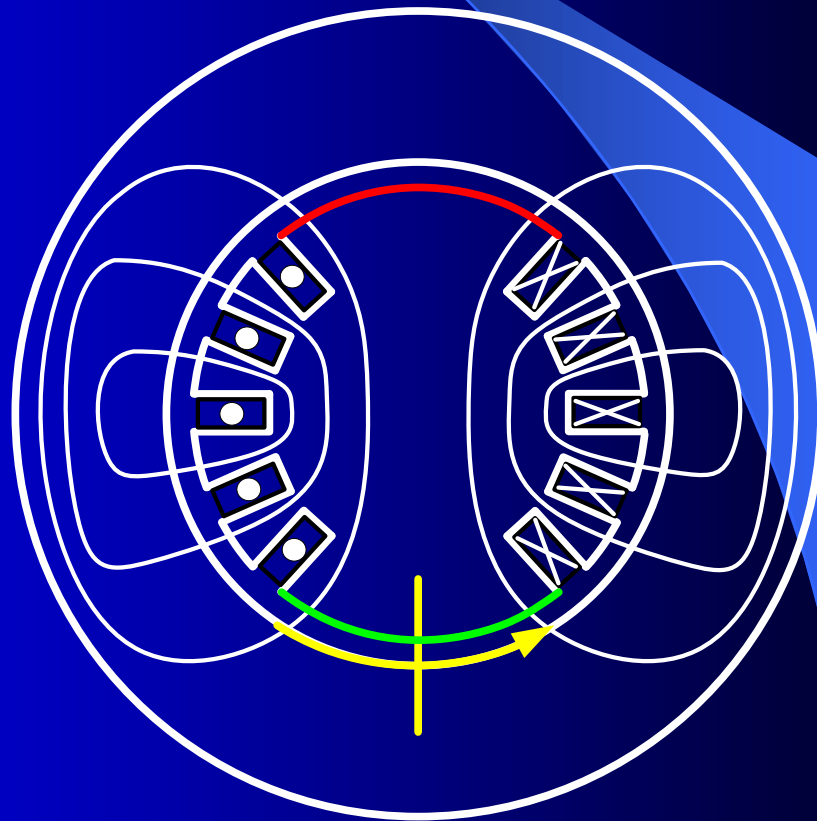
$k_f$  一励磁磁动势波形系数，  $k_f = \frac{4}{\pi}$



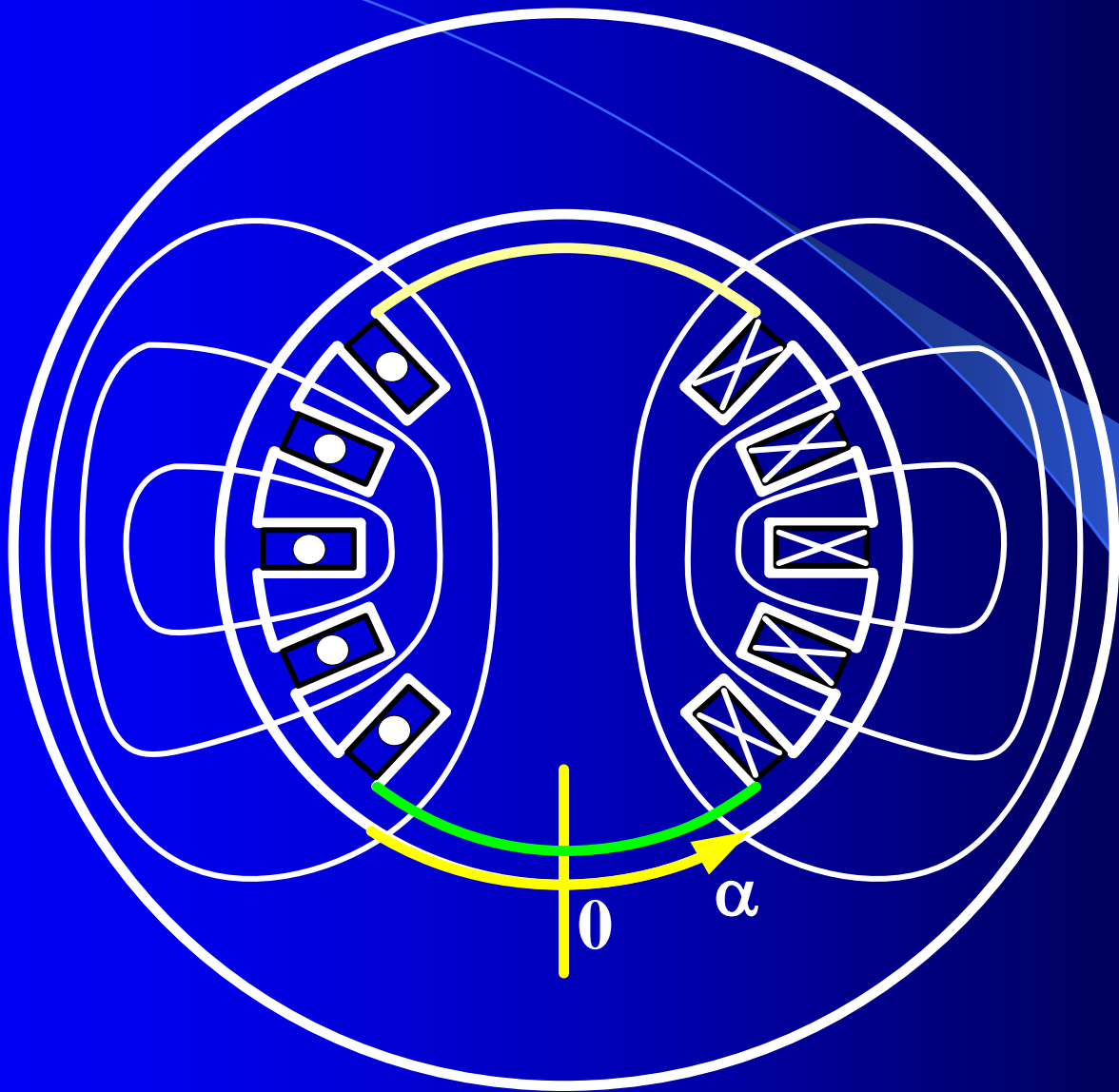
## 2) 隐机发电机

励磁绕组放置在磁极两边槽里，磁极中间不放绕组以使磁极磁动势波形接近正弦，每极磁势最大

幅值为：
$$F_f = \frac{1}{2} N_f i_f$$

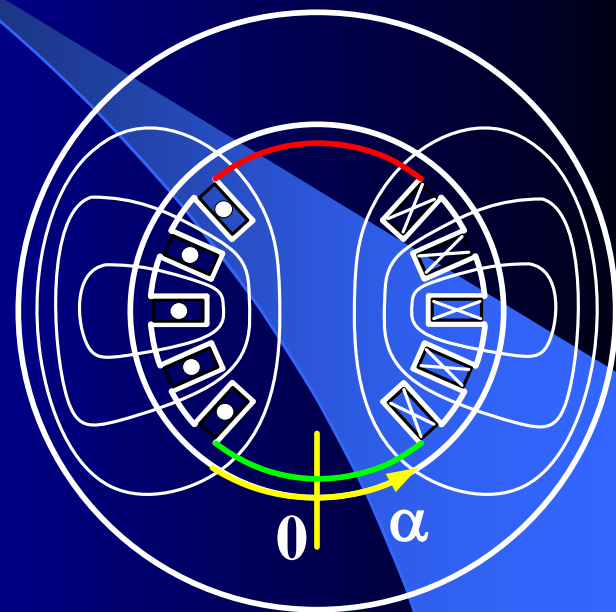
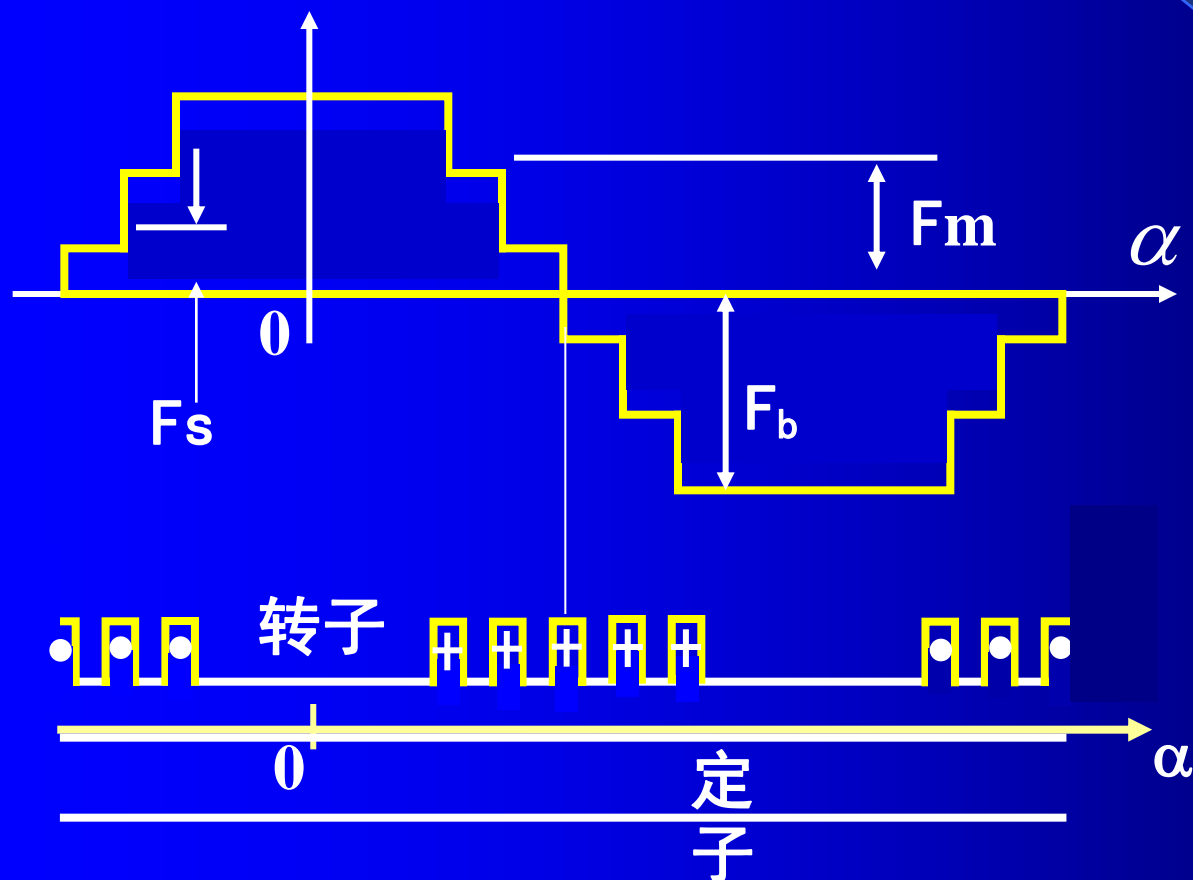






# 隐极同步电机气隙磁势

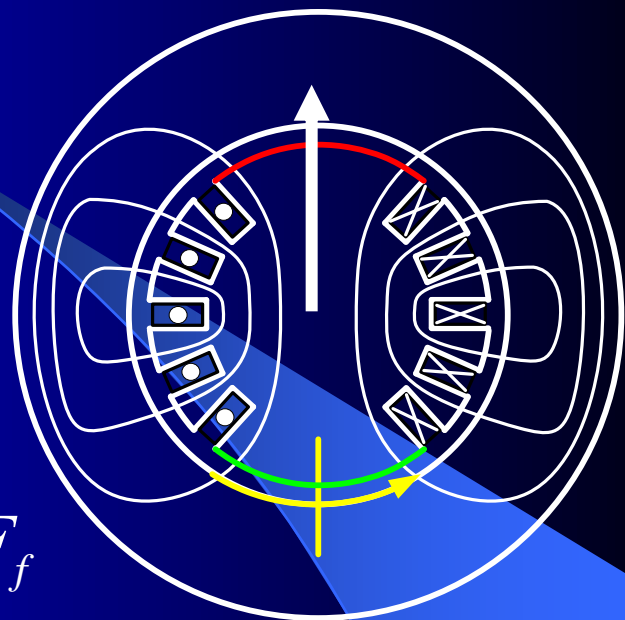
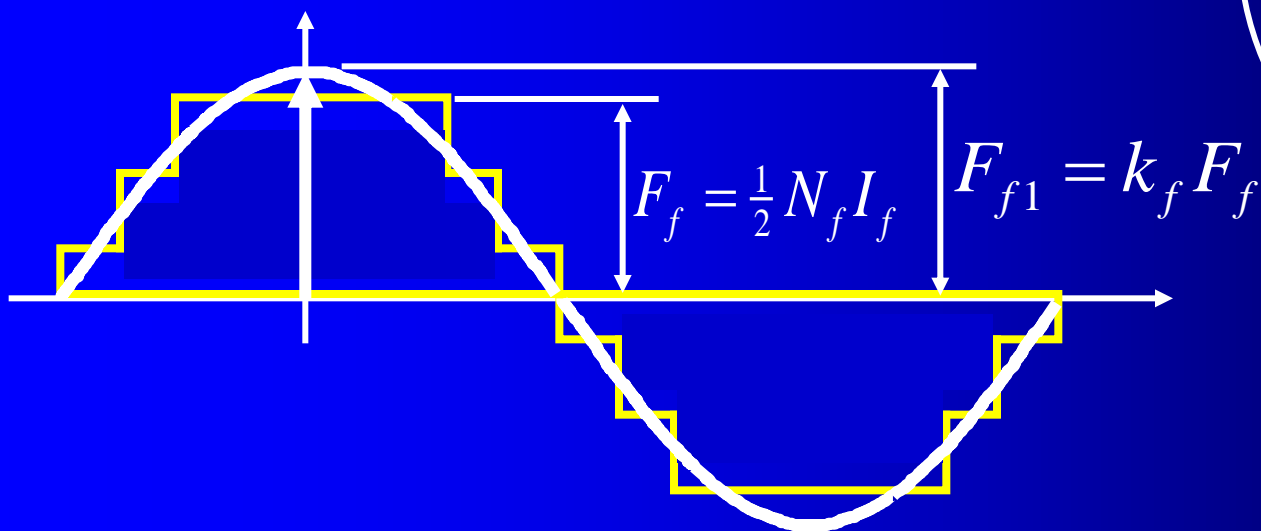
图示3个闭合回路所包围的安匝数分别为 $N_k I$ ,  $3N_k I$ 与 $5N_k I$ , 所以气隙磁势为阶梯波。



看大图

# 隐极同步电机气隙磁势

阶梯波气隙磁势的基波幅值为  $F_{f1}$ 。图中： $N_f = 5N_k$

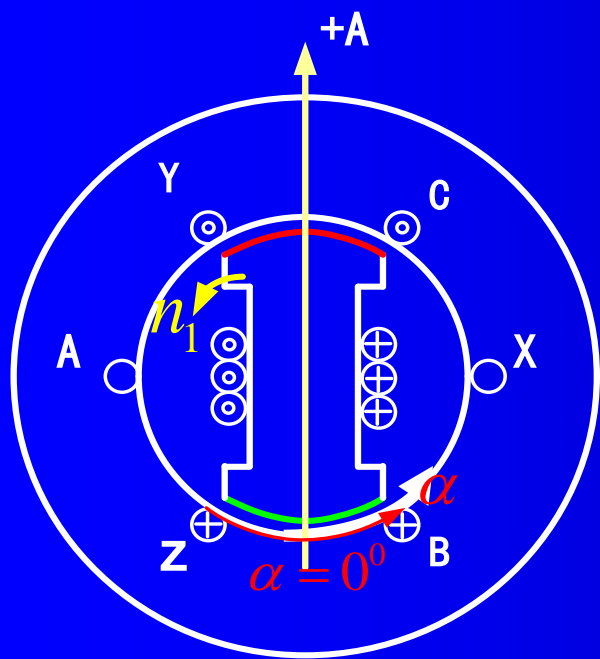


通过实际总槽数  $Z_2$  与沿转子表面开的等距槽的总槽数  $Z'_2$  的比值查表得  $k_f$ 。

## 2 基波励磁磁动势空间矢量

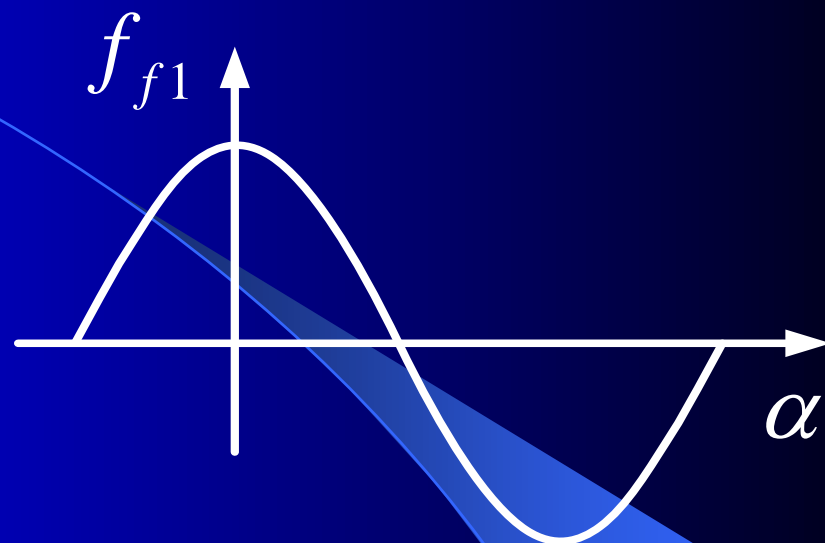
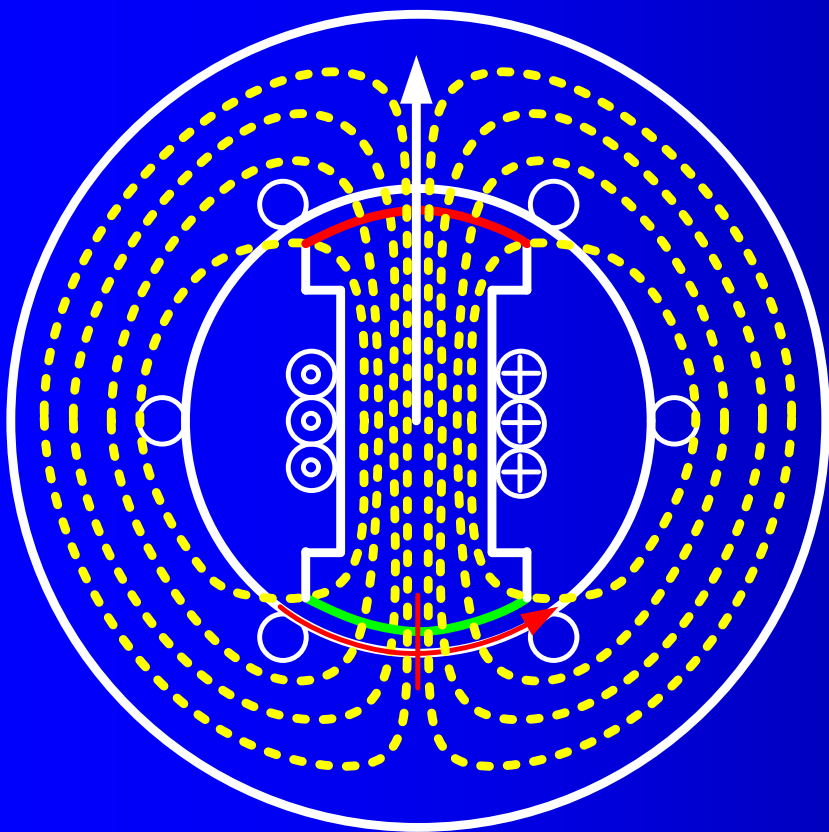
空间参考轴选择定子A组绕组轴线+A处，基波励磁磁动势用空间向量表示。

向量长度等于基波磁动势的幅值，向量位置为基波磁动势正波幅所在位置，向量以角速度 $\omega$ 逆时针方向转动。

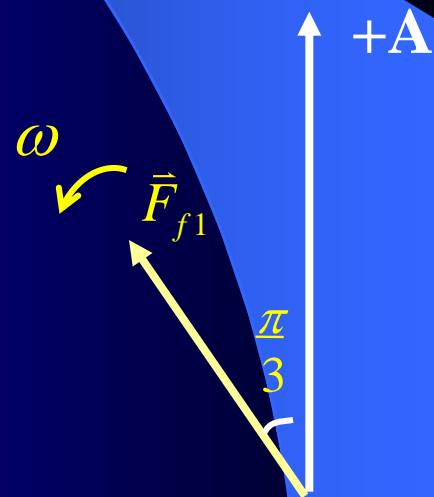
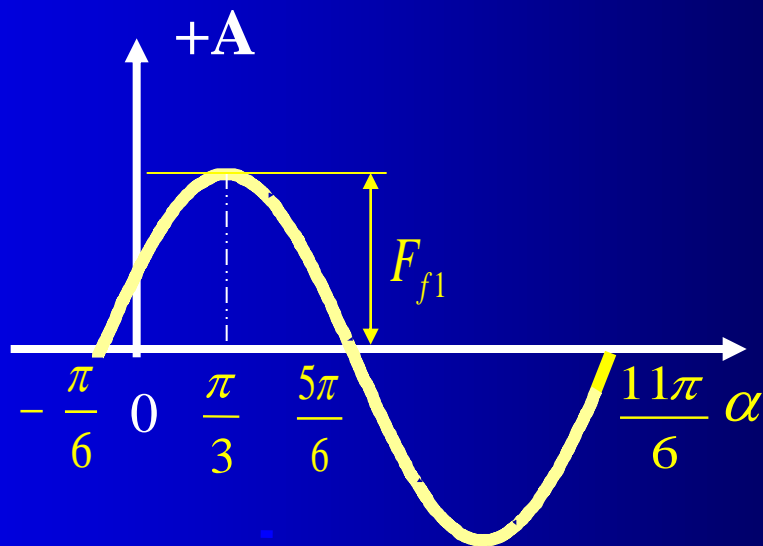
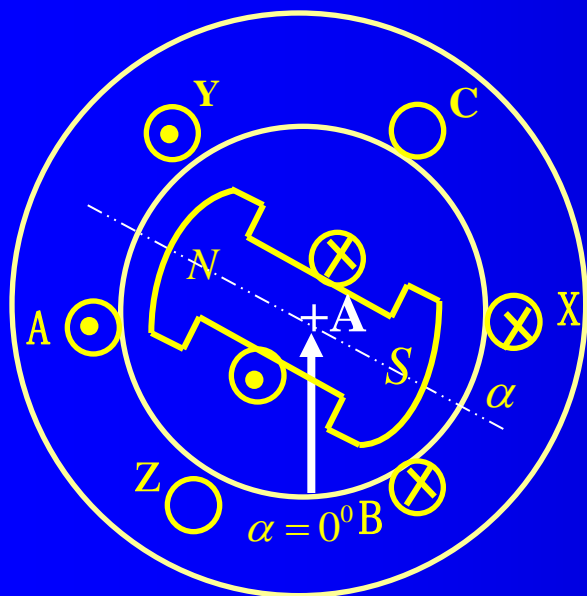
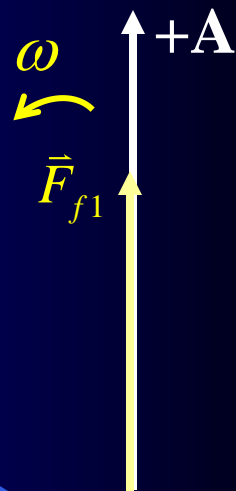
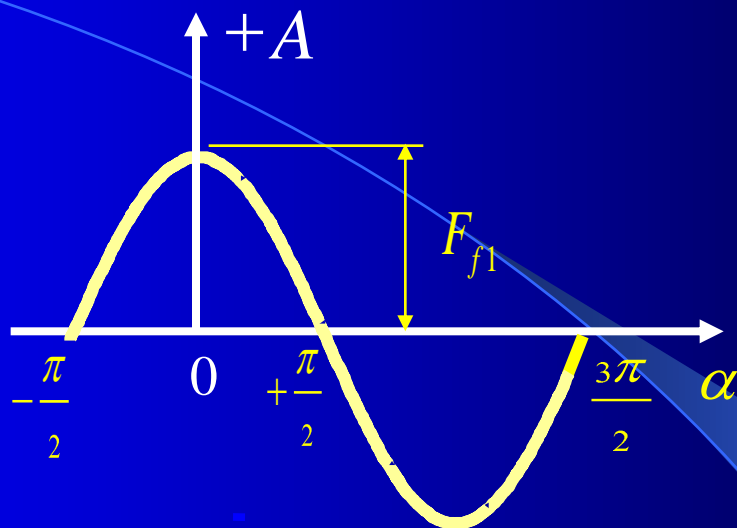
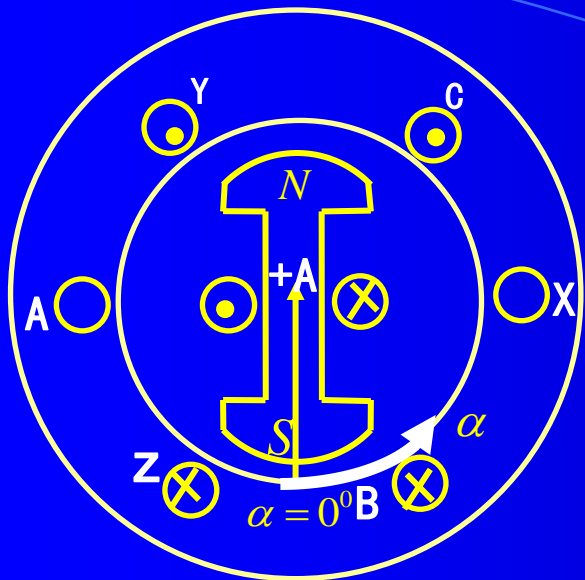


① 转子的初始位置：转子S极中心在坐标轴（ $\alpha = 0^\circ$ ）上的位置；

② 基波励磁磁动势在空间向量的位置：转子S极中心线与+A 轴的夹角。



基波磁动势波形



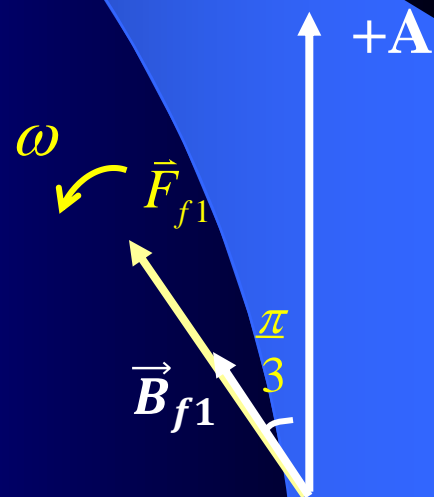
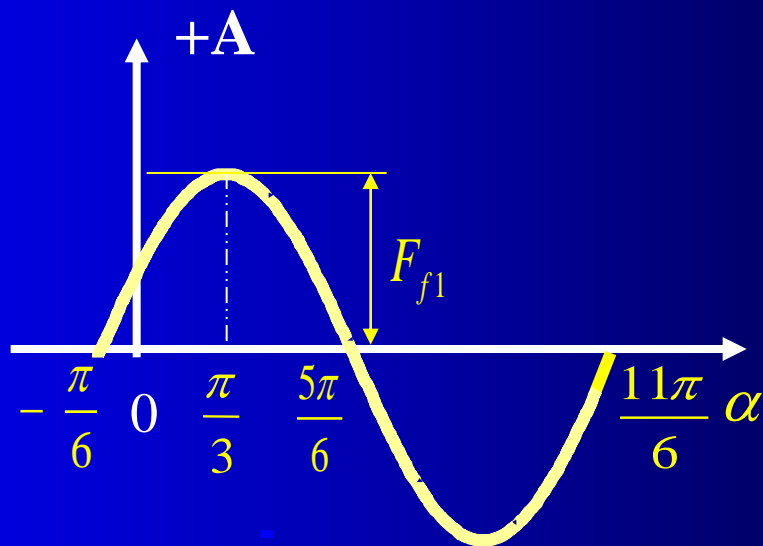
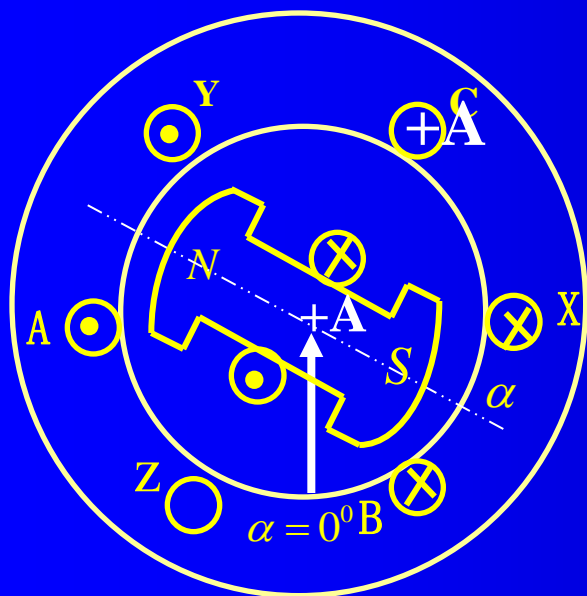
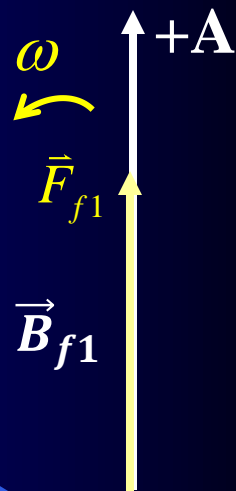
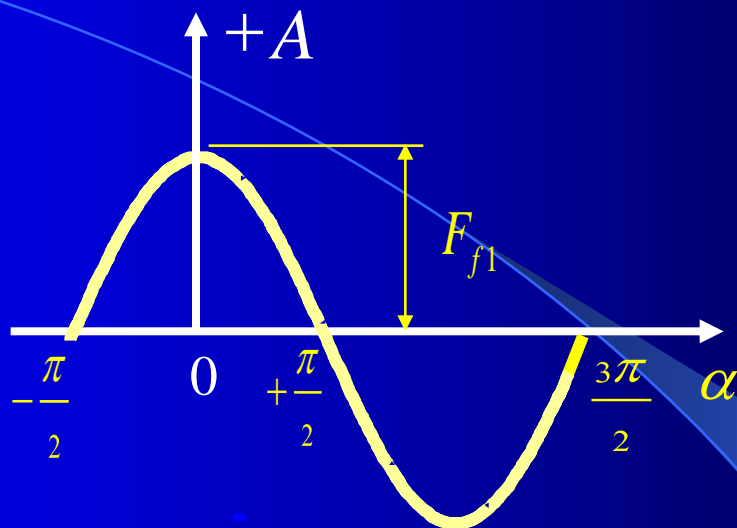
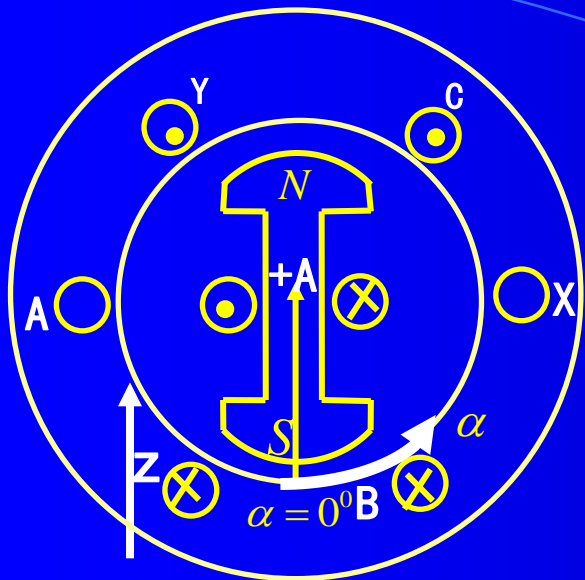
### 3 基波气隙磁密空间矢量

#### 1) 隐极机

气隙均匀，当铁心不饱和时，气隙磁密与磁动势成正比，基波磁动势产生正弦波磁密；当磁路饱和时，若不考虑磁极的磁滞涡流效应下，基波磁密波的相位和基波磁动势波的相位相同。

#### 2) 凸极机

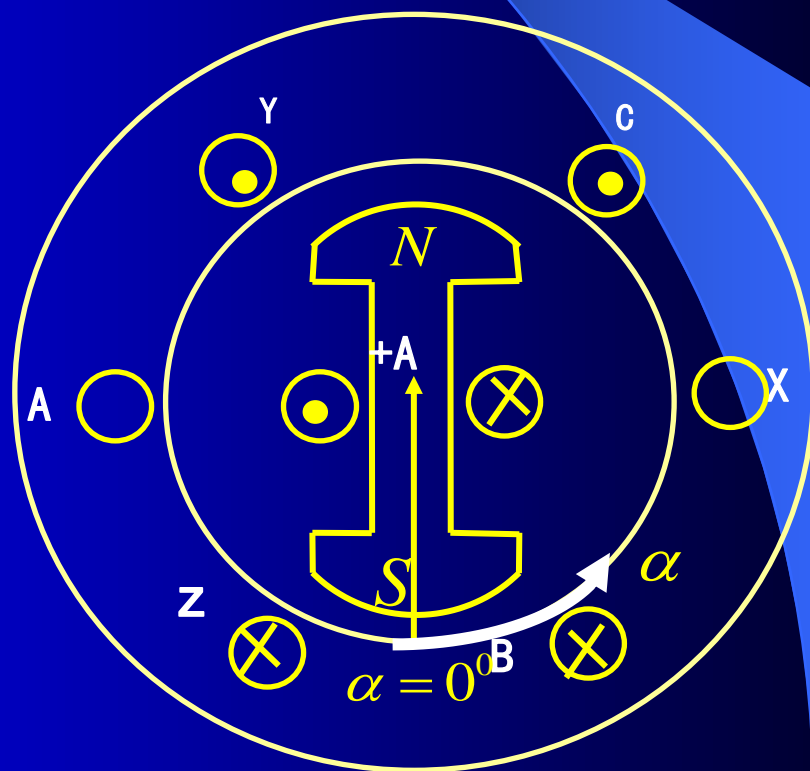
气隙不均匀，即使铁心不饱和，气隙中产生的磁密大小与磁动势大小不成正比，正弦的基波励磁磁动势产生的磁密波是非正弦分布的（尖顶波），磁密波还要分解基波和一系列谐波，基波磁密和基波磁动势仍然同相位。





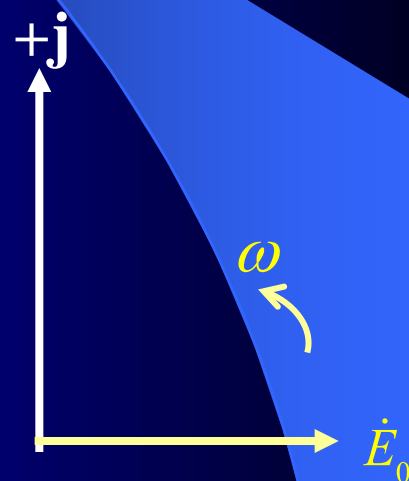
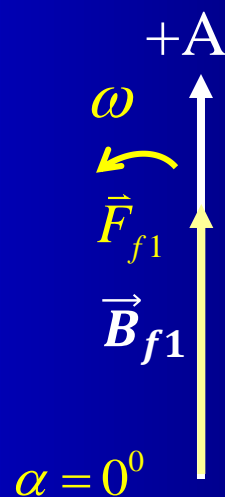
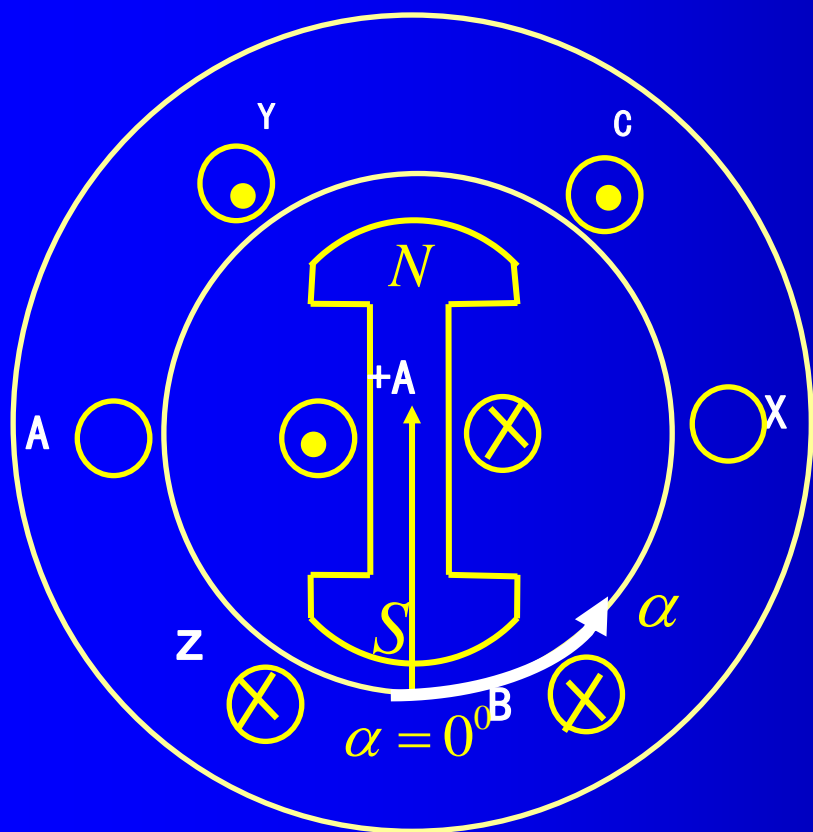
## 4 定子相绕组的感应电动势、时间相量

气隙磁密旋转切割定子三相绕组，定子绕组感应随时间正弦变化的电动势，用时间相量来表示。由于空间坐标选A相绕组轴线+A为参考轴，所以时间相量也分析A相。



## 4 定子相绕组的感应电动势、时间相量

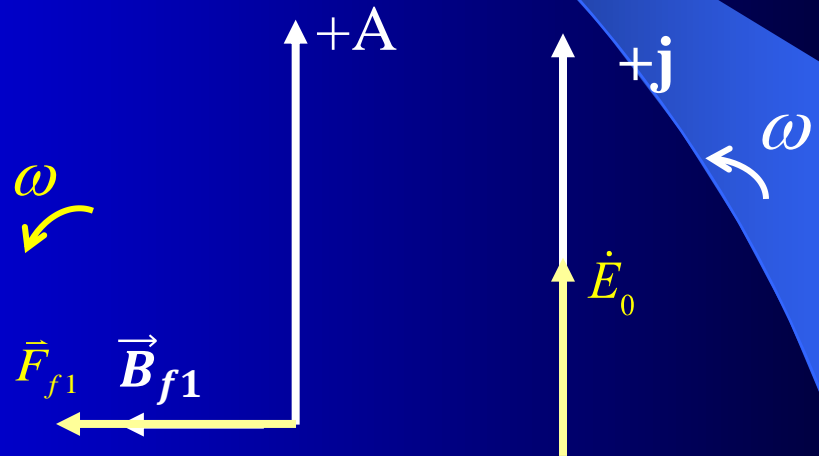
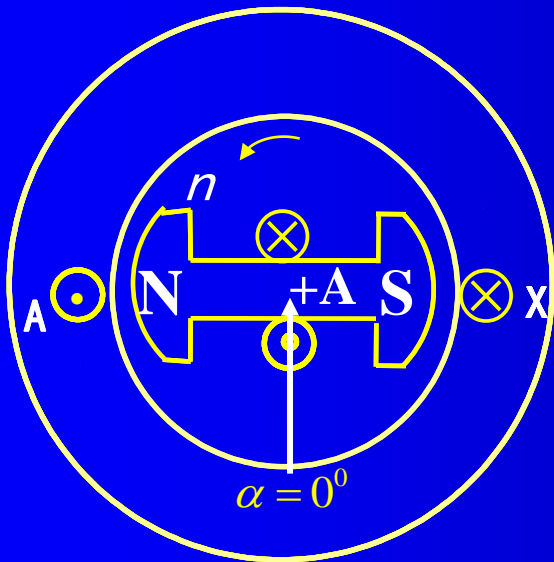
### 1) 磁极中心与+A轴线重合



磁通最大时，感应电势为0

## 2) 磁极中心与A相绕组重合

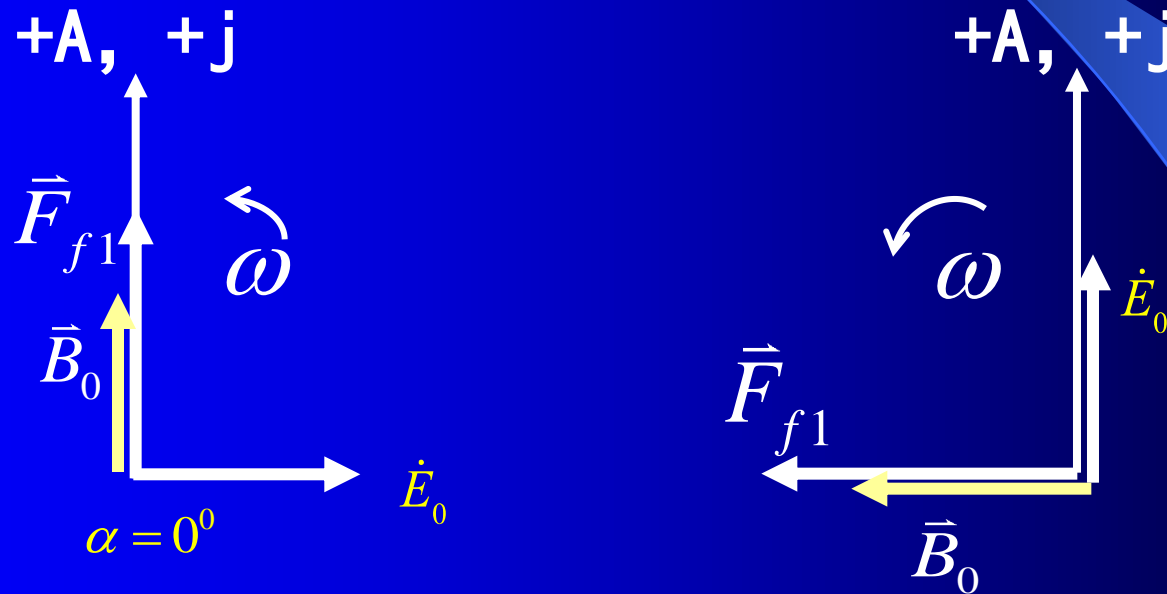
$\vec{F}_{f1}$  及  $\vec{B}_{f1}$  均领先+A轴。A相绕组边处于磁极中心线，磁密最大，磁通为0，A相绕组感应电动势瞬时值为正最大。



$$E = -\frac{d\psi}{dt}$$

## 5 时空相—矢量图

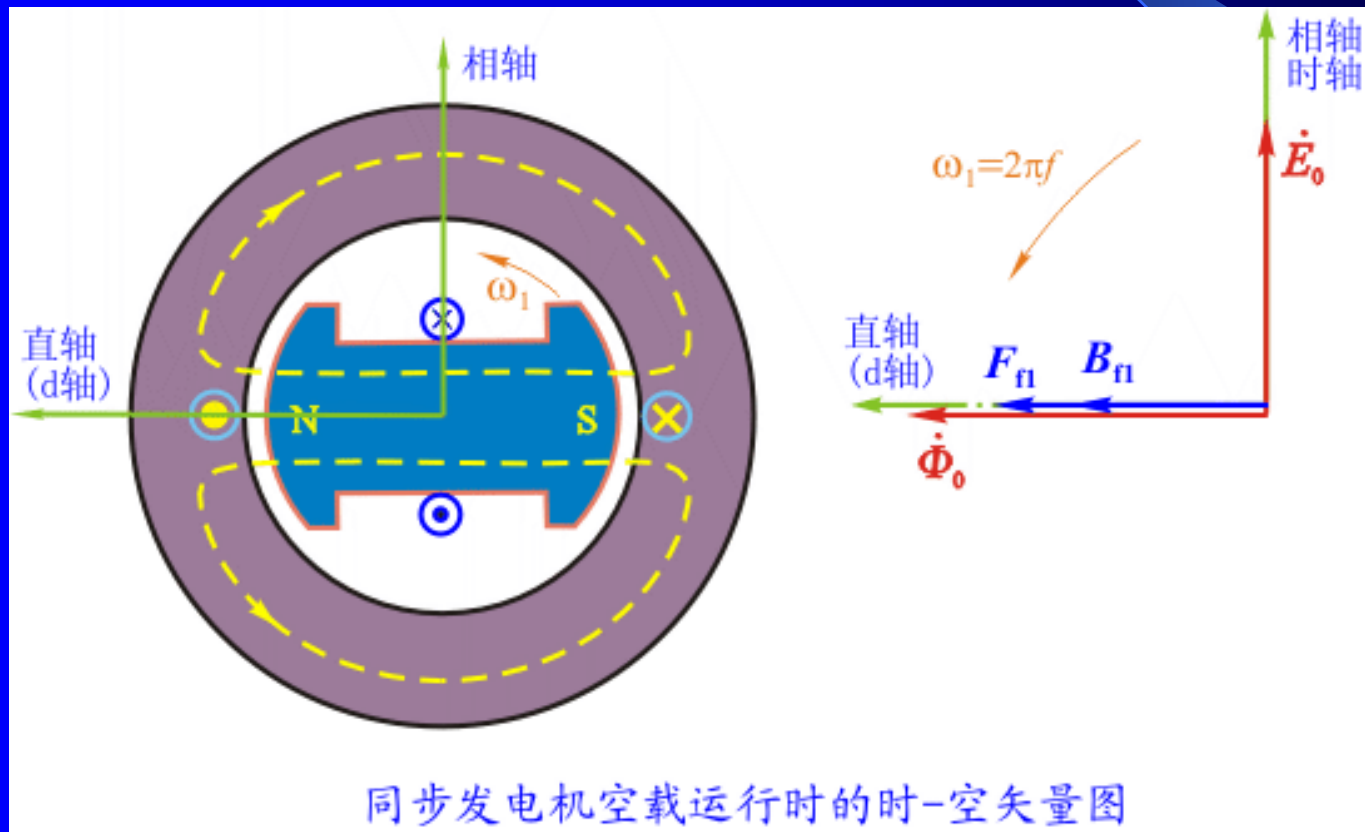
将空间+A与时间+j重合在一起，将磁势与电势向量画在一个图中，构成时间-空间向量图，即时-空相-矢量图。

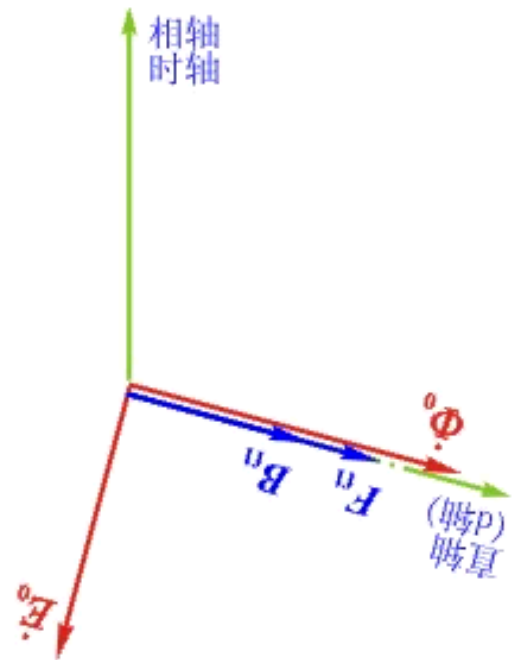
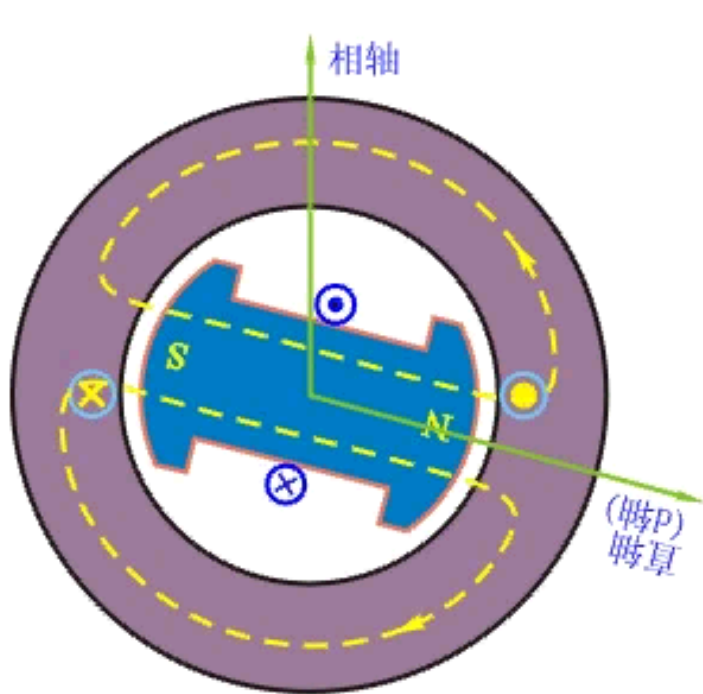


结论：在时空相—矢量图中，A相电动势  $\dot{E}_0$  总是落后于转子励磁磁动势  $\vec{F}_{f1}$  或励磁磁密矢量  $\vec{B}_{f1}$   $90^\circ$

## ● 直轴和交轴

- 习惯上称转子绕组的轴线为直轴，用符号  $d$  表示
- 两极之间的中线称为交轴，用符号  $q$  表示
- $\vec{F}_{f1}$  和  $\vec{B}_{f1}$  始终与  $d$  轴正方向一致





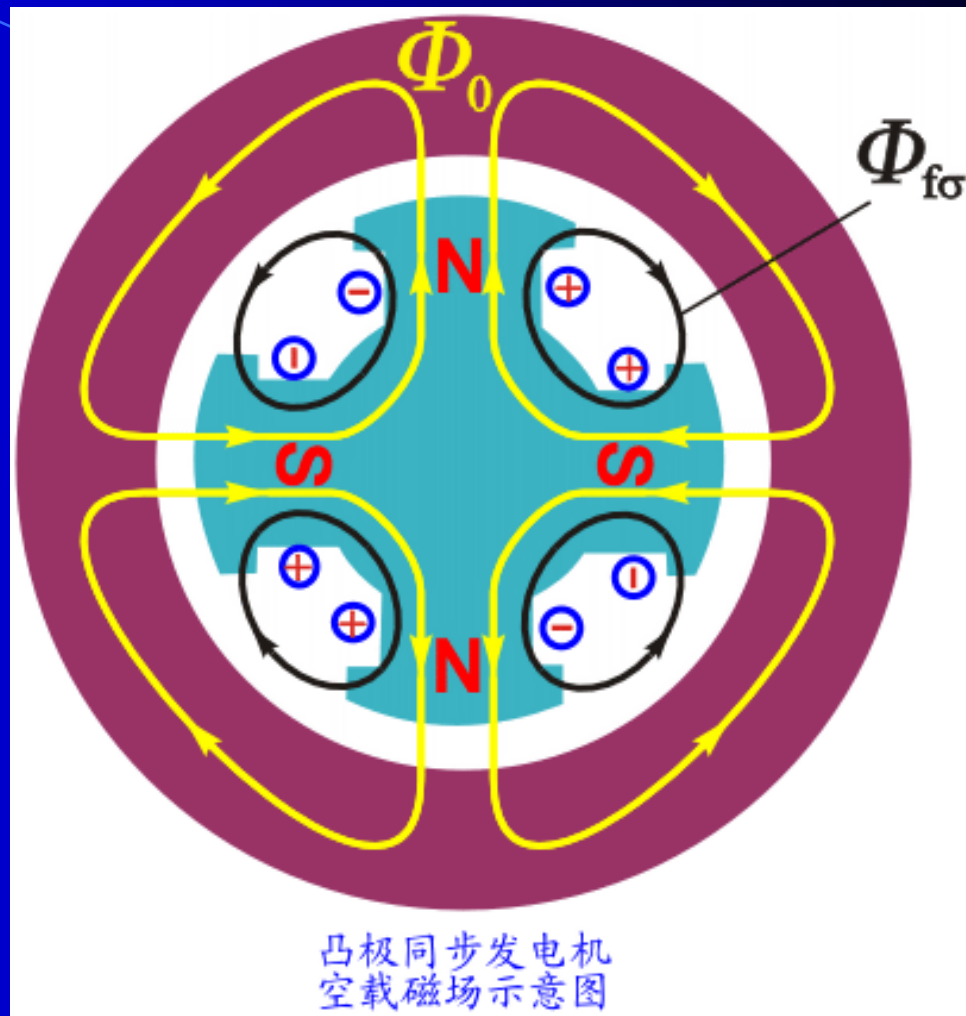
同步发电机空载运行时的时空矢量图

- 时间相量表示的是绕组中的感应电势、电压和电流以及绕组所交链的磁通
- 空间矢量表示的是磁势和磁通密度。
- 时间相量之间、空间矢量之间的相角是有明确物理意义的
- 时间相量与空间矢量之间的“相角”是没有物理意义的

# 空载电动势相量

# 主磁通

# 主极漏磁通



凸极同步发电机空载磁场示意图



## 电压波形正弦畸变率

$$k_v = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots + U_{mk}^2 + \dots}}{U_{m1}}$$

改善发电机发出的波形，提高其正弦波的程度，基本途径有：

- 1、励磁电流产生接近与正弦分布的气隙磁通密度波形
- 2、定子每相绕组采用分布和短距线圈
- 3、三相绕组采用Y接法

## 2 对称负载时的电枢反应

定义：电枢磁动势对励磁磁动势的影响称电枢反应

### 1 磁动势分析

1) 定子三相对称绕组中对称三相电流产生基波电

枢磁动势  $\vec{F}_a$

(1) 大小：  $F_a = 1.35 \frac{N_1 I_1 k_{dp1}}{p}$  (A)

(2) 转速：  $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$  (r/min)

(3) 转向：沿通电相序A、B、C的方向，它与转子转向相同

(4) 极对数：和转子极对数P相同，决定于绕组的节距  $y_1$

## 2) 转子励磁绕组通入直流产生基波励磁磁动势 $\vec{F}_{f1}$

(1) 大小:  $F_{f1} = \frac{1}{2} k_f N_f i_f$  (A)

(2) 转速: 和转子转速一样为同步速;

(3) 转向: 和转子转向一致;

(4) 极对数: 和转子磁极的极对数相同。

## 结论：

定子绕组的基波电枢磁动势和转子的基波励磁磁动势，它们的转速、转向、极对数均相同，彼此之间相对静止，因此两者的合成磁动势将是一个同样转向、转速、极对数的旋转磁动势，由它们合成在电机中产生气隙磁场。

谐波电枢磁动势和励磁磁动势没有固定作用，不能合成恒定的磁动势。谐波励磁磁动势很小。

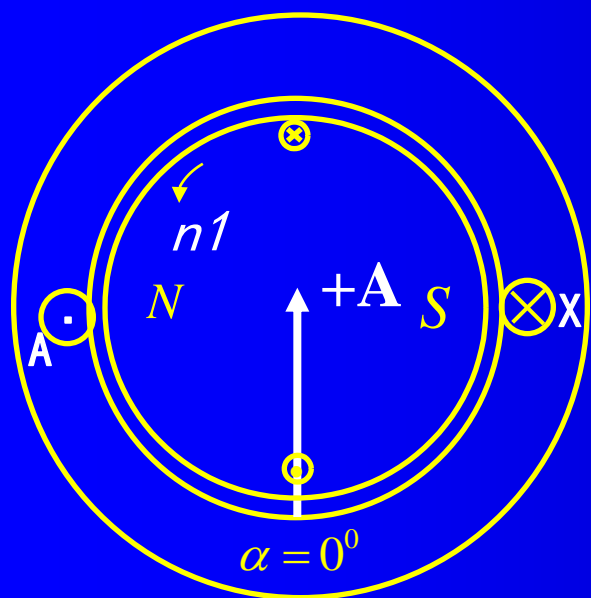
# 励磁磁势和电枢磁势的区别

	基 波 形	大 小	位 置	转 速 转 向
励 磁 势	正弦波	恒定，由励磁电流决定	由转子位置决定	由原动机的转速决定
电 枢 反 磁 势	正弦波	恒定，由电枢电流决定	由电枢电流瞬时值决定	由电枢电流的频率大小和相序决定

## 2 基波电枢磁动势对基波励磁磁动势的作用

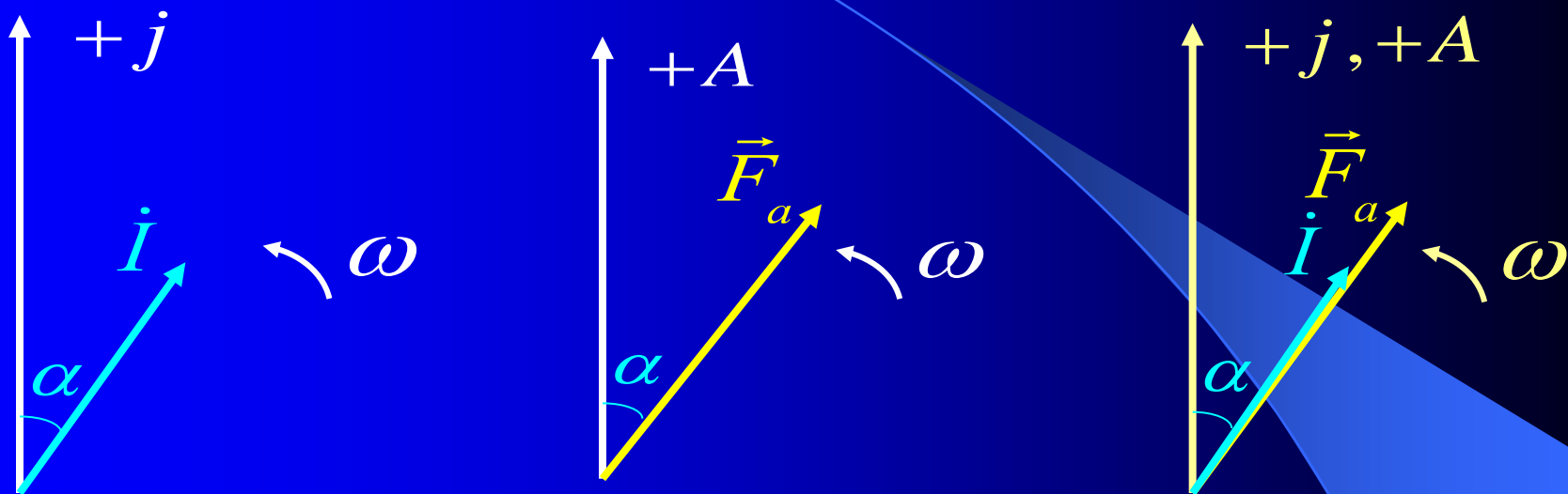
电机带负载后,  $i \neq 0$ , 由于所带负载性质不同, 使  $\dot{E}_0$  和  $i$  之间相位角  $\psi$  不同, 电枢反应的性质也不同。

设  $\omega t = 0$  时, 转子S极中心在空间坐标轴超前  $90^\circ$  的位置, 即  $\alpha_0 = 90^\circ$  的位置。



- $\vec{F}_a$  —— 空间基波电枢磁动势向量
- $\vec{F}_{f1}$  —— 空间基波励磁磁动势向量
- $\dot{E}_0$  —— 空载时定子一相电动势

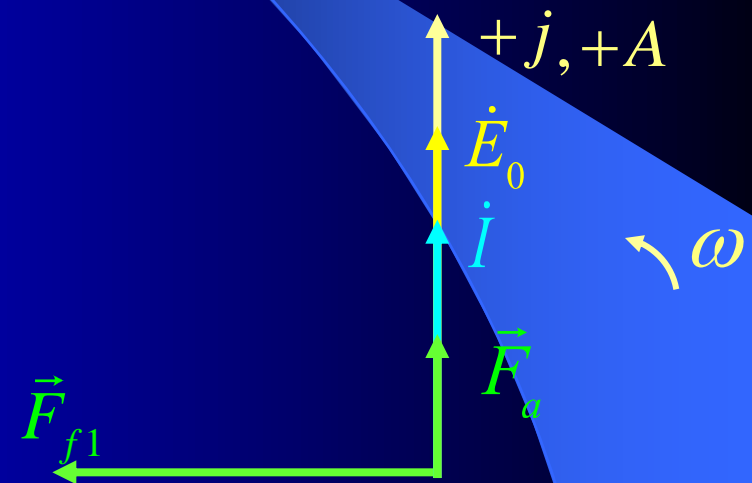
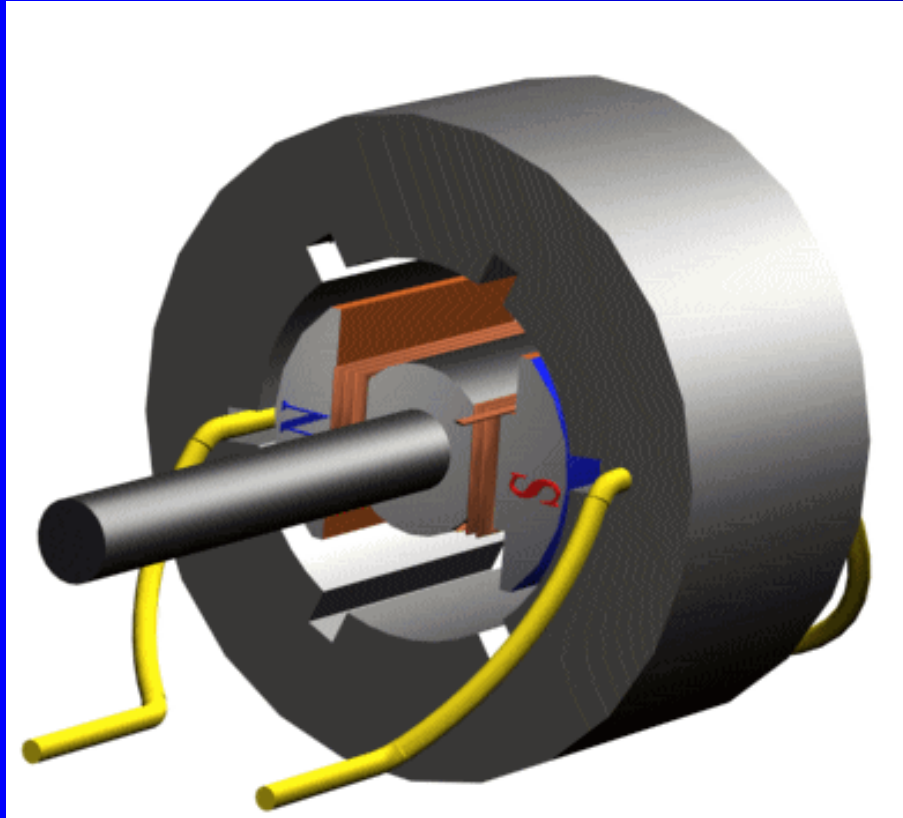
- 1)  $\psi = 0^\circ$  ,  $\cos\psi = 1$ 的情况
- 2)  $\psi = 90^\circ$  (落后) ,  $\cos\psi = 0$  的情况
- 3)  $\psi = 90^\circ$  (领先) ,  $\cos\psi = 0$  的情况
- 4)  $\psi$  为落后的一个任意角

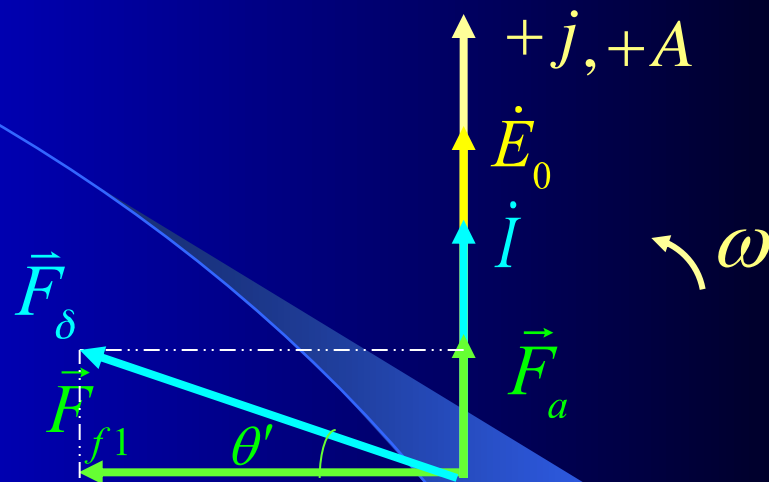
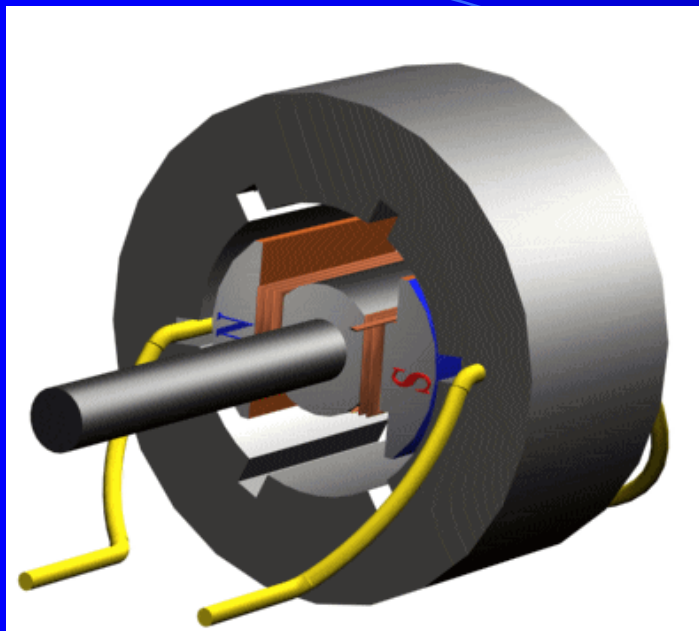


当时间 $+j$ 轴与空间参考轴 $+A$ 轴重合时，电枢电流  $\vec{i}$  将与电枢磁动势  $\vec{F}_a$  重合。



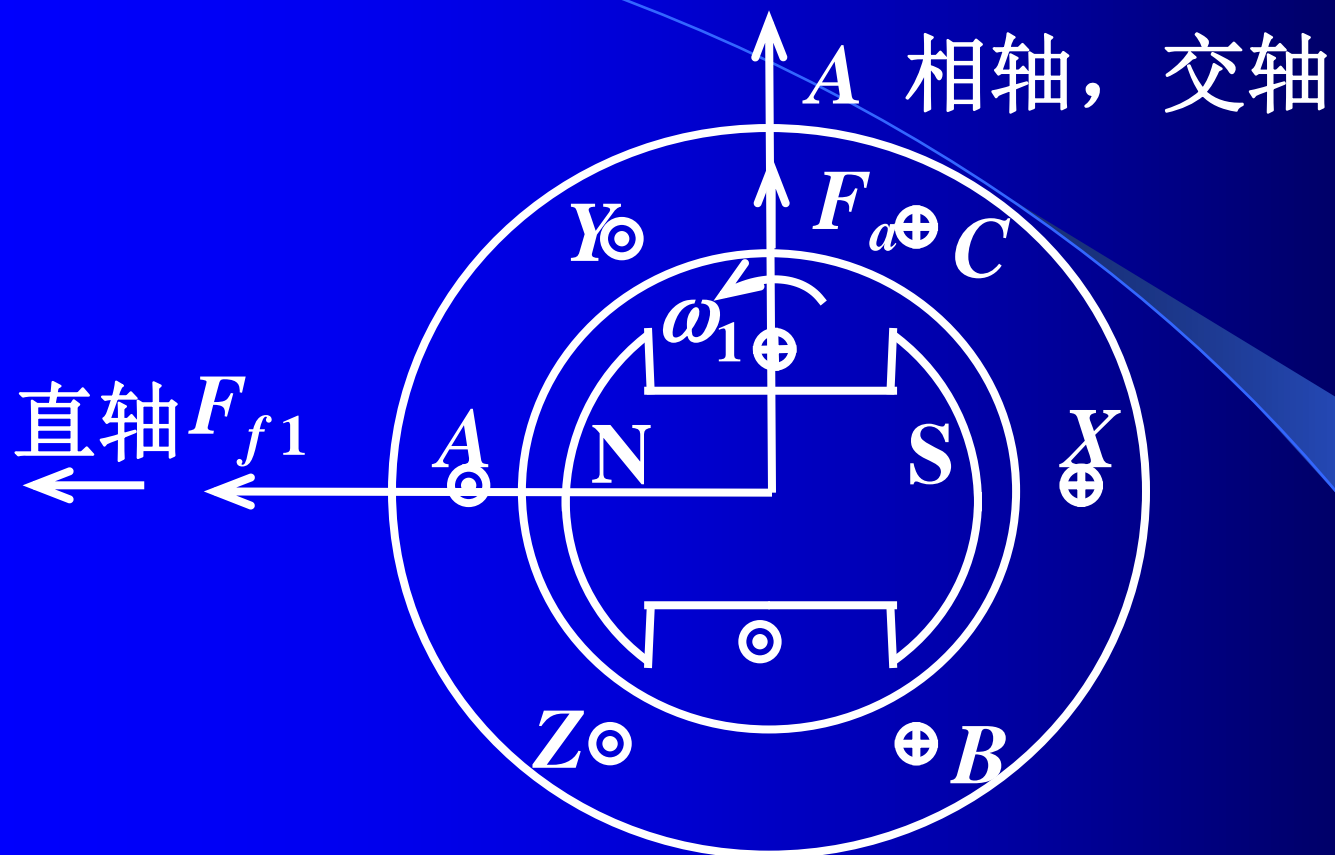
1)  $\psi = 0^\circ$  ,  $\cos\psi = 1$ 的情况



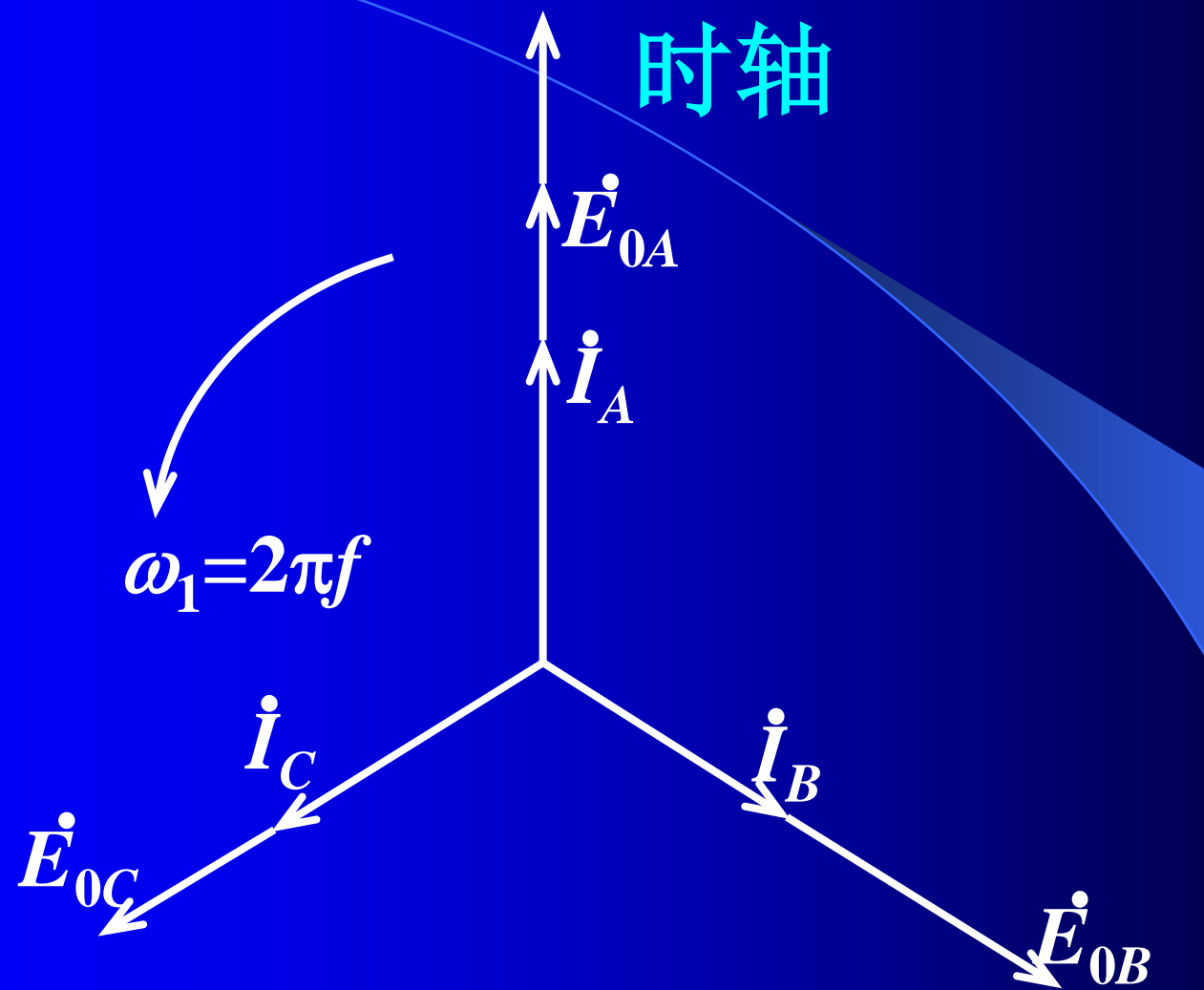


结论：

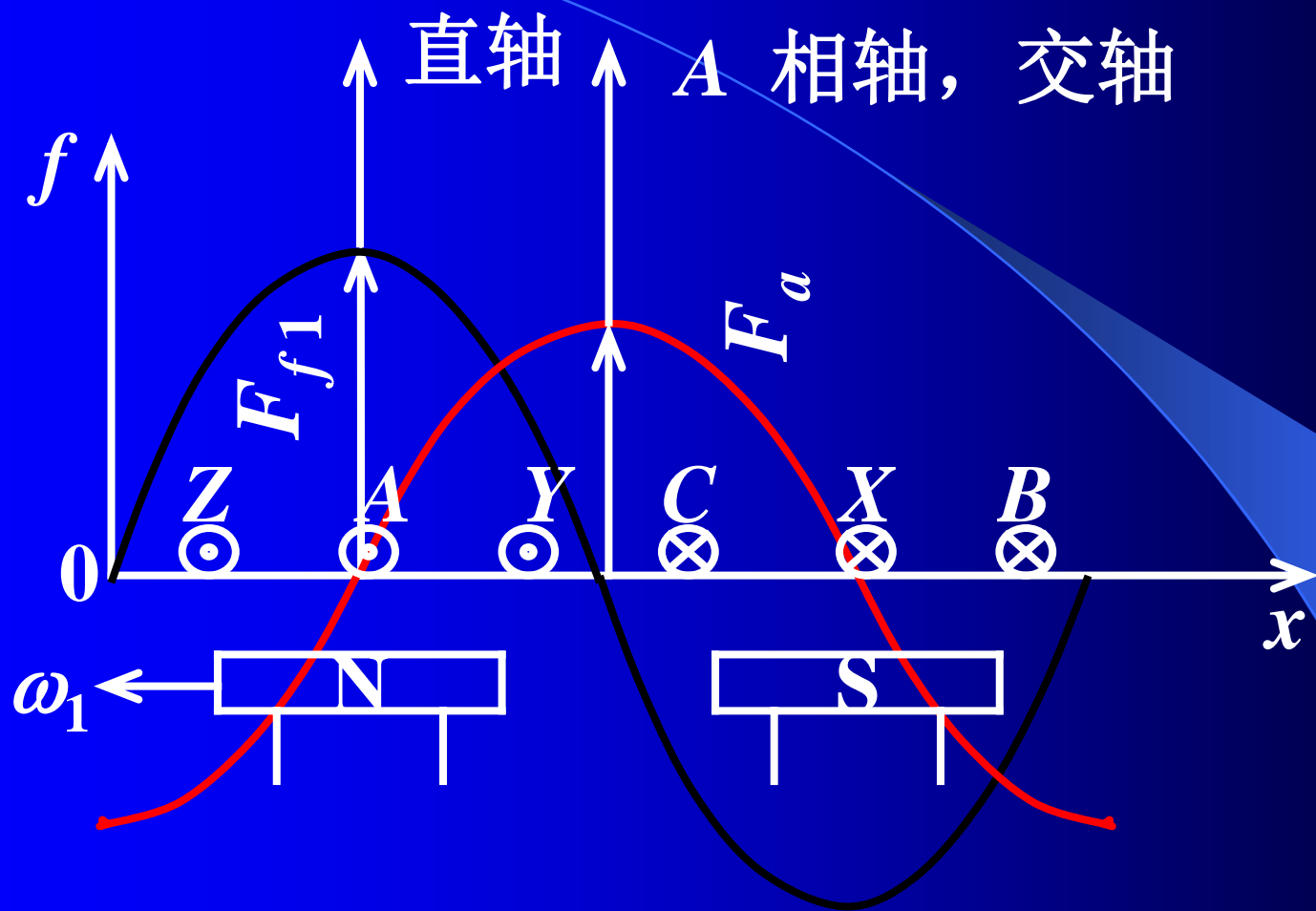
电枢反应磁动势  $\vec{F}_a$  落后励磁磁动势  $\vec{F}_{f1}$   $90^\circ$  空间电角度，叫做交轴电枢反应磁动势，交轴电枢反应使合成磁动势  $\vec{F}_\delta$  与励磁磁动势  $\vec{F}_{f1}$  不在一个方向上，相差一个相角  $\theta'$ 。



电机剖面图

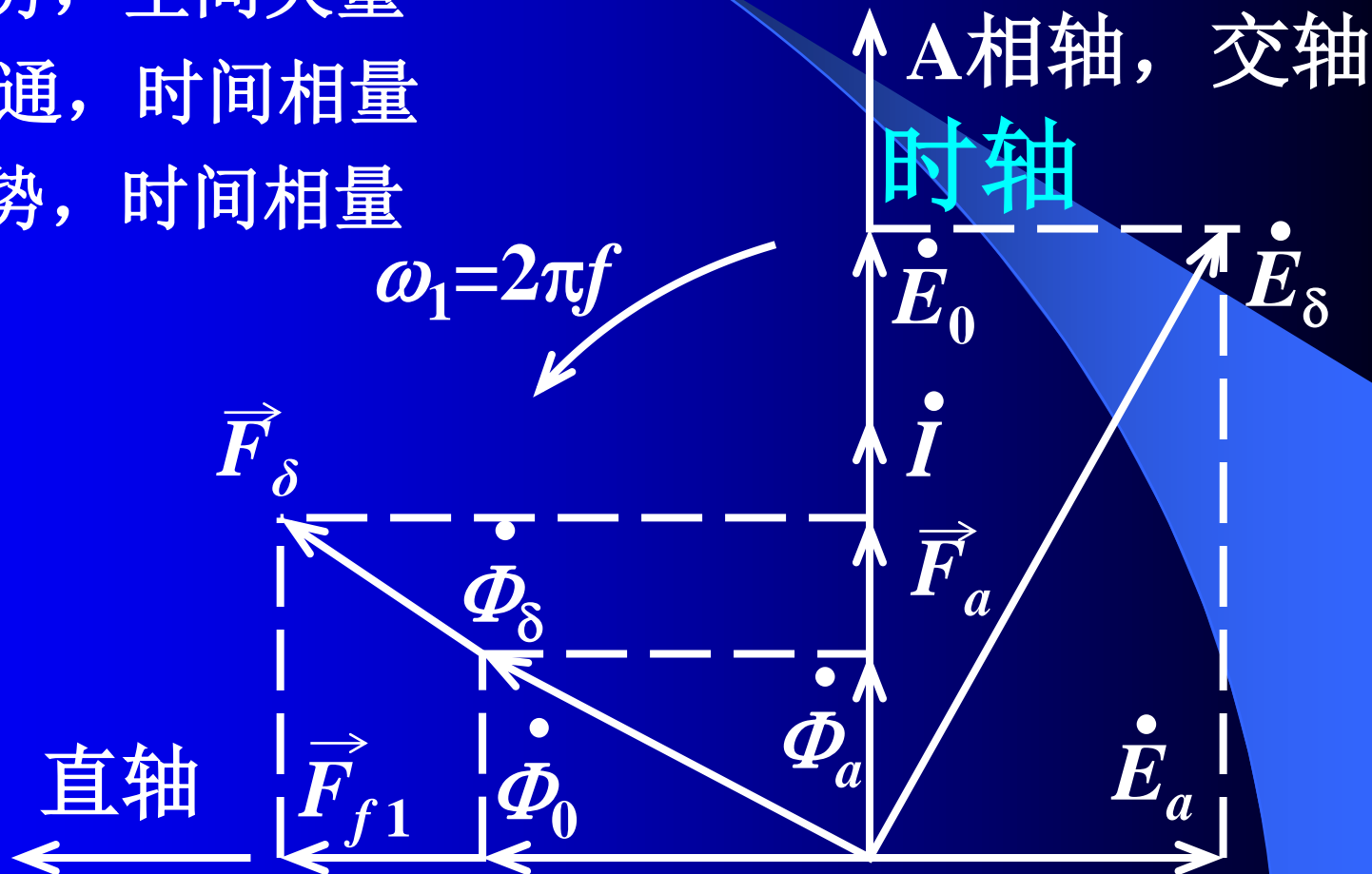


$\psi=0$ 时，电动势、电流时间相量图



$\psi=0$ 时, 磁动势空间分布图

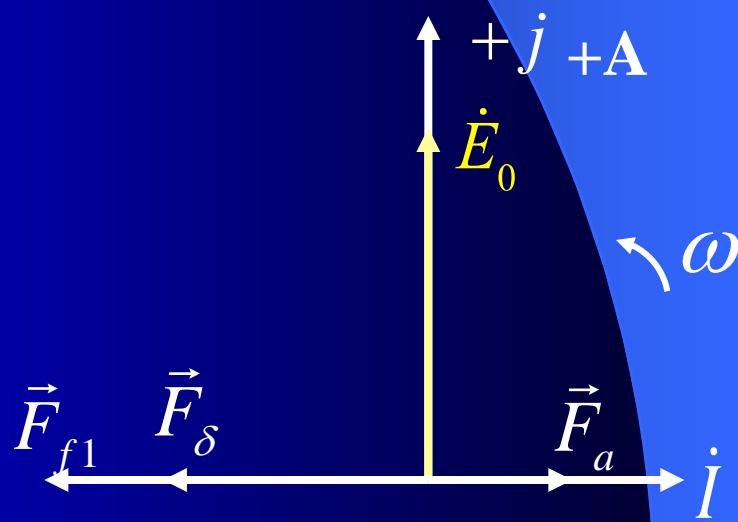
- $\dot{\Phi}_a$  电枢反应磁通，它是时间相量
- $\dot{E}_a$  电枢反应电势，时间相量
- $\vec{F}_\delta$  合成磁势，空间矢量
- $\dot{\Phi}_\delta$  合成磁通，时间相量
- $\dot{E}_\delta$  合成电势，时间相量

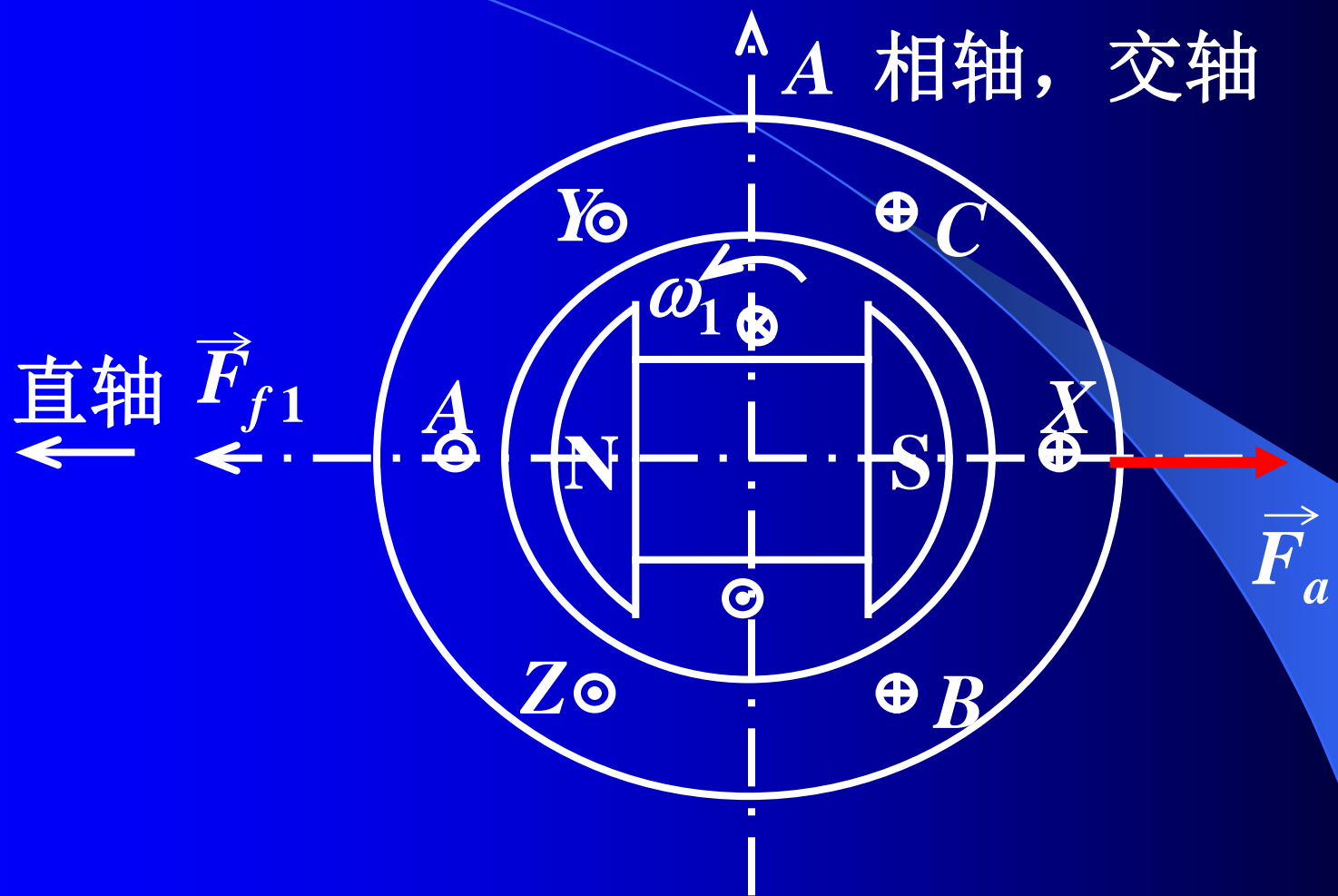


2)  $\psi = 90^\circ$  (落后),  $\cos\psi = 0$  的情况

$\vec{F}_a$  与  $\vec{F}_{f1}$  相差  $180^\circ$ ,  $\vec{F}_a$  对  $\vec{F}_{f1}$  起去磁作用,  
此时的  $\vec{F}_a$  叫直轴去磁电枢反应磁动势。

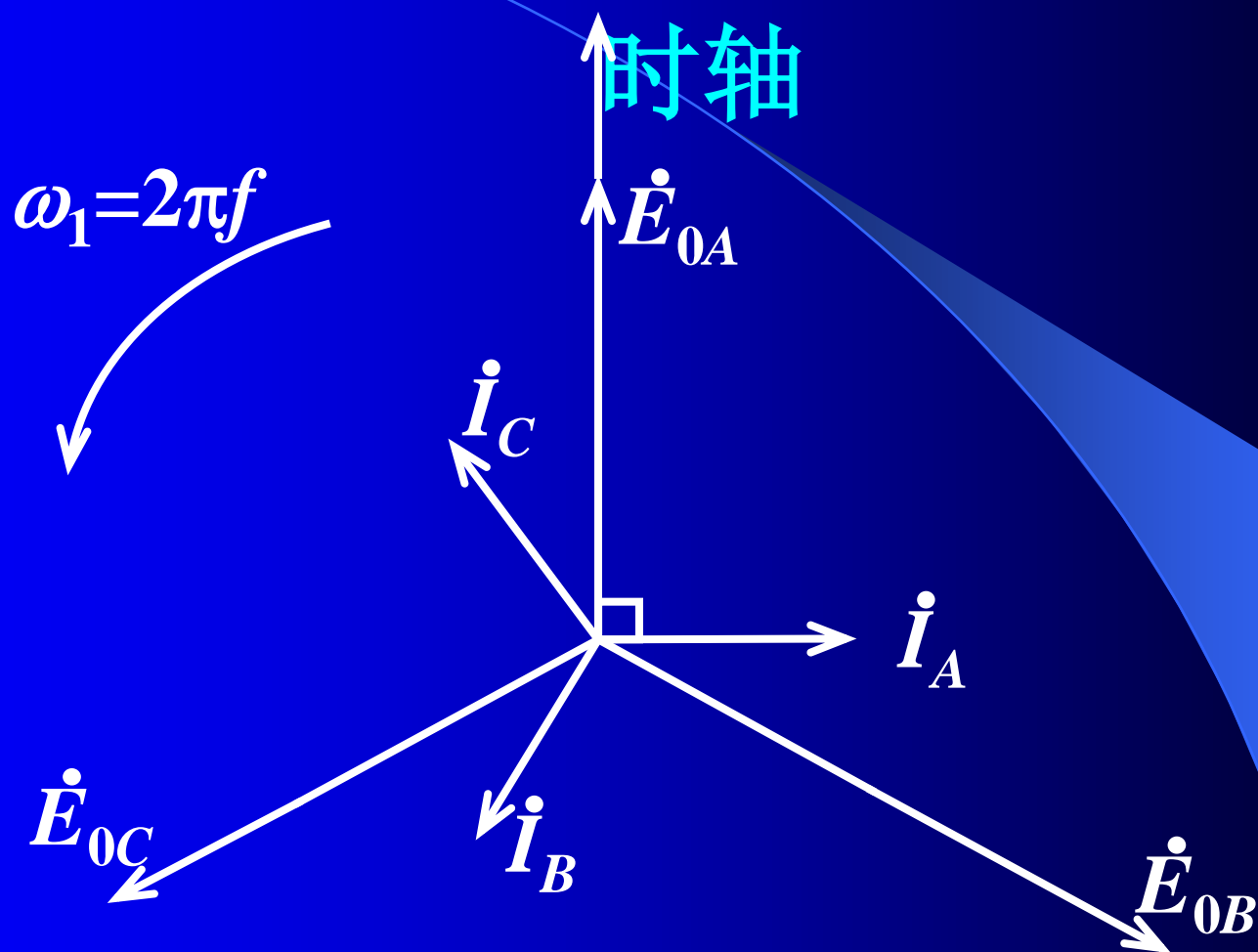
直轴去磁电枢反应使合成磁  
动势  $\vec{F}_\delta$  比  $\vec{F}_{f1}$  减小, 气隙  
磁密比空载时减小, 感应电  
动势相应减小,  $\vec{F}_\delta$  与  $\vec{F}_{f1}$  同  
相位, 即  $\theta' = 0^\circ$



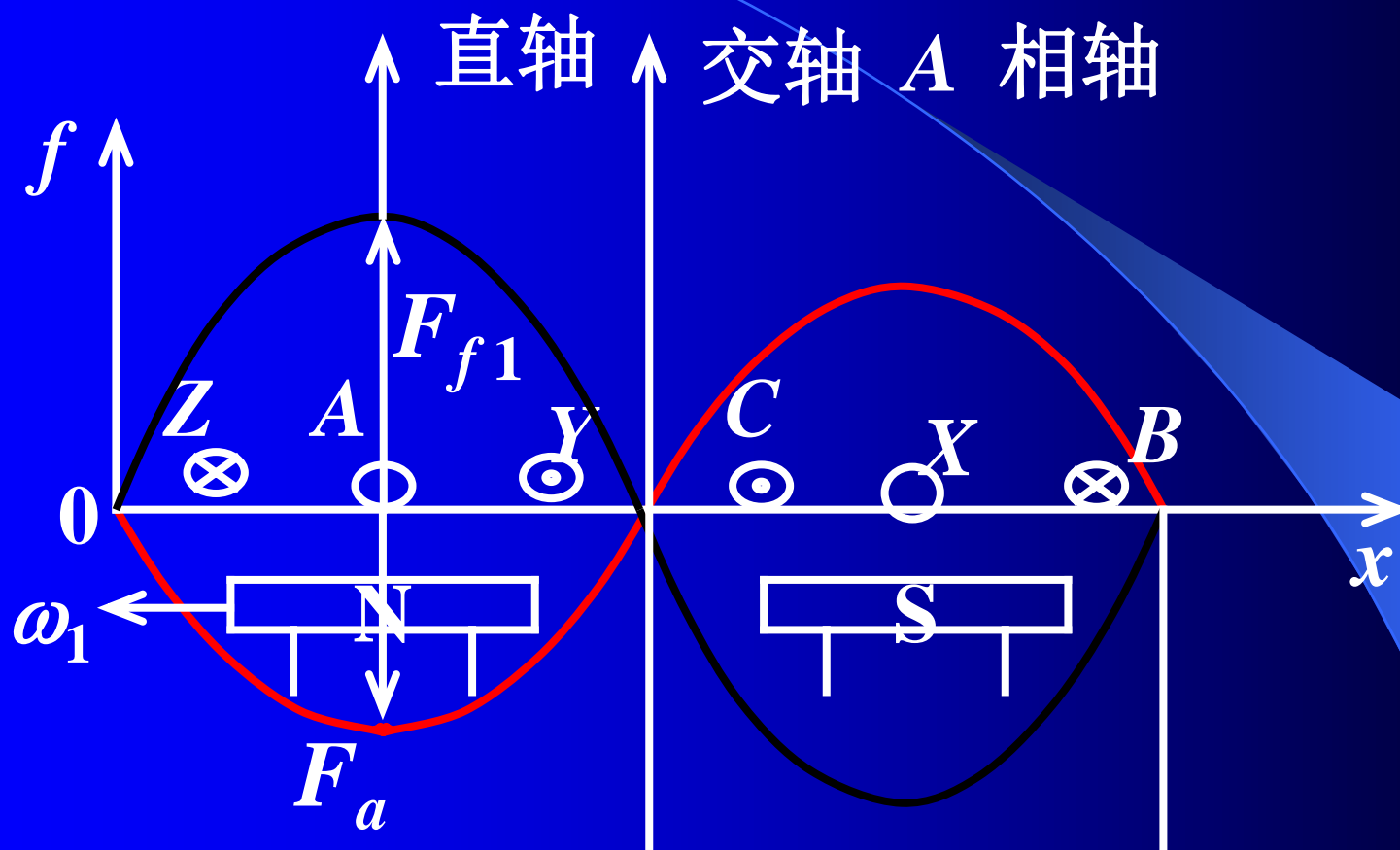


$\psi = \pi/2$  时的电枢反应

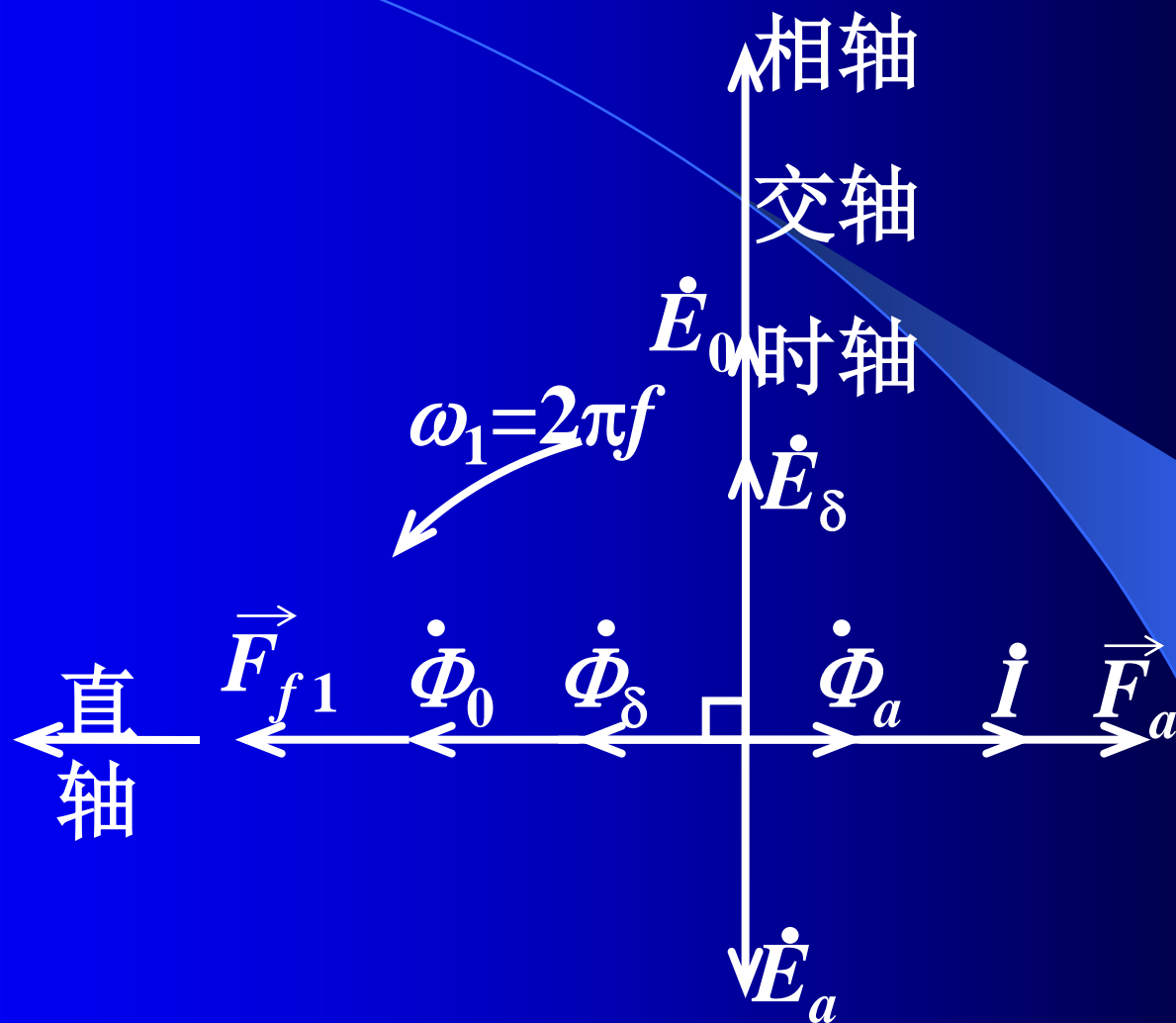




$\psi = \pi/2$  时的电枢反应



$\psi = \pi/2$  时的电枢反应

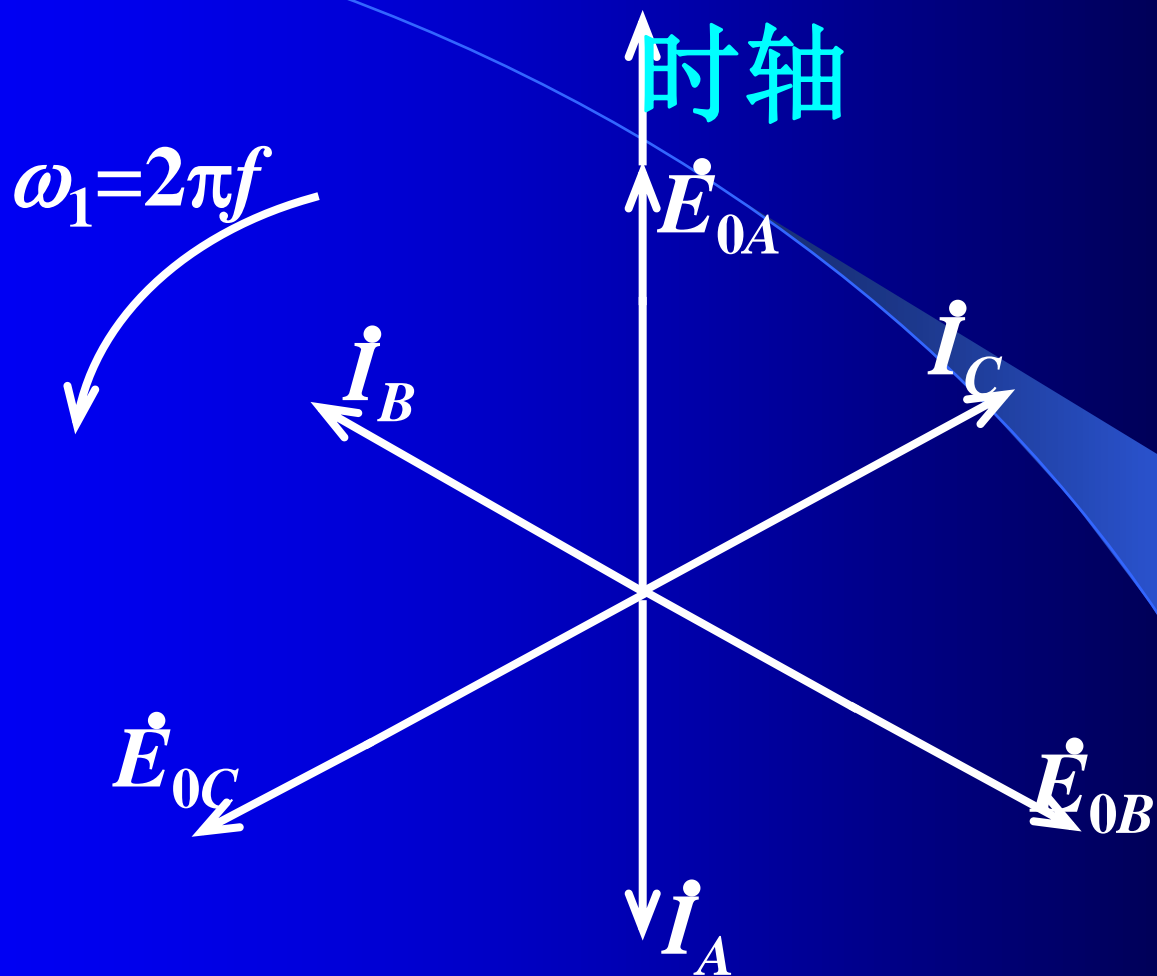


$\psi = \pi/2$  时的电枢反应

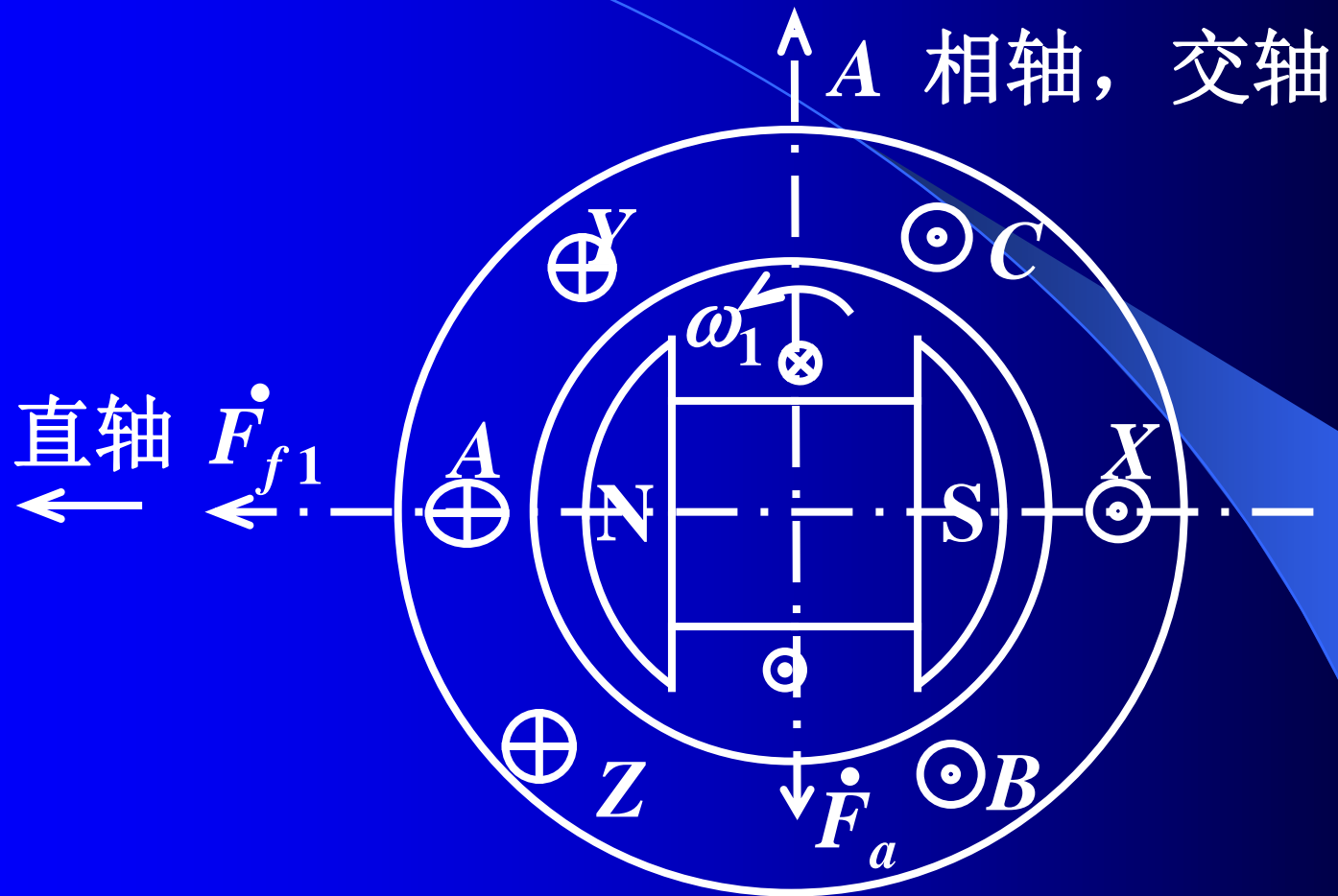
- 由于电网的电压需保持不变，要求空气隙的合成磁场近似保持不变
- 在 $\psi = \pi/2$ 时，电枢反应起去磁作用，原有的直流激磁就不够了，应相应增大，便称直流激磁增加后的同步电机运行状态为过励状态
- 结论：过励磁运行状态下的同步电机将输送电感性无功功率至电网

### 3) 内功率因数角 $\Psi = \pi$

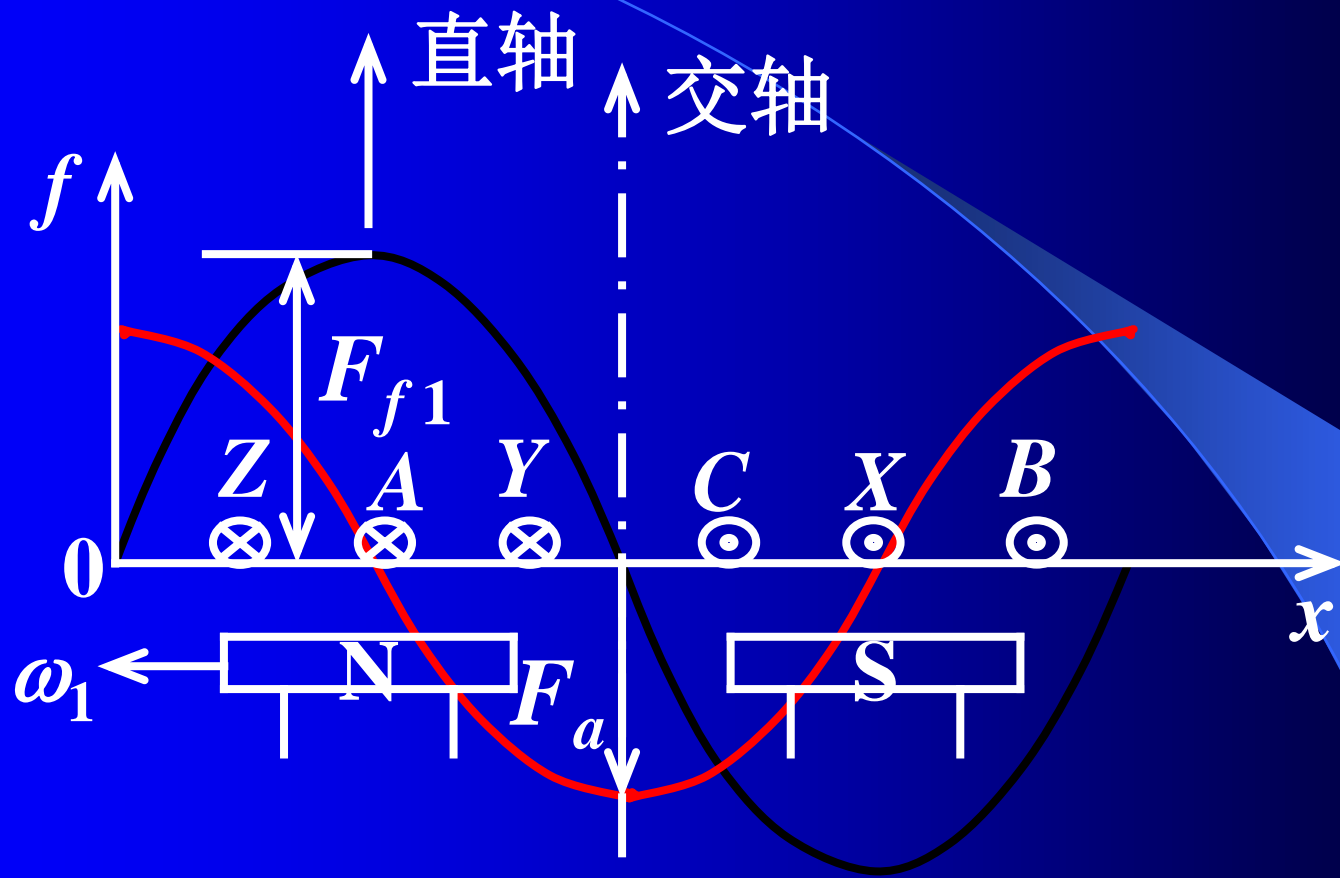
- 有功功率将从电网输送到电机，故实际上是电动机运行。
- $F_a$ 作用在交轴，与相轴正方向反相，是交轴电枢反应



$\psi = \pi$  时的电枢反应

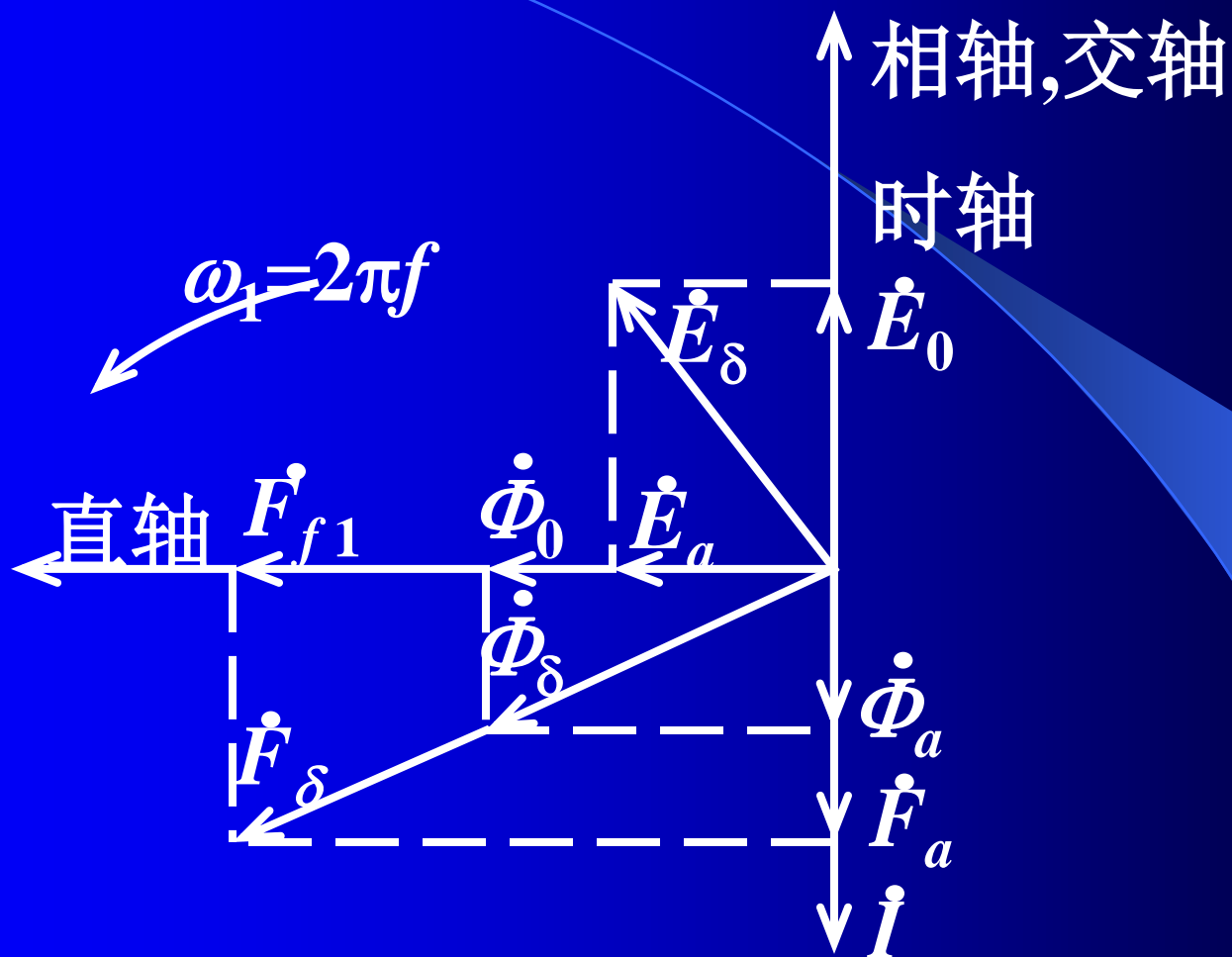


$\psi=\pi$ 时的电枢反应



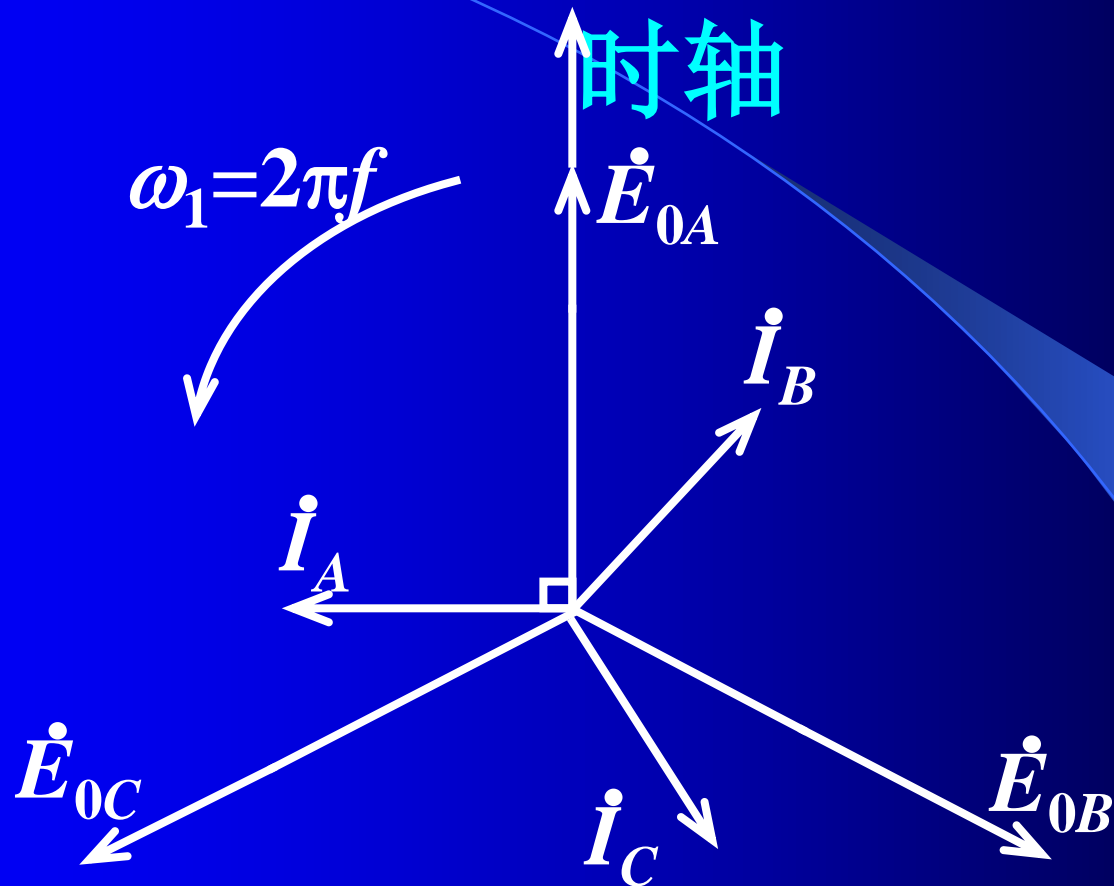
$\psi = \pi$  时的电枢反应



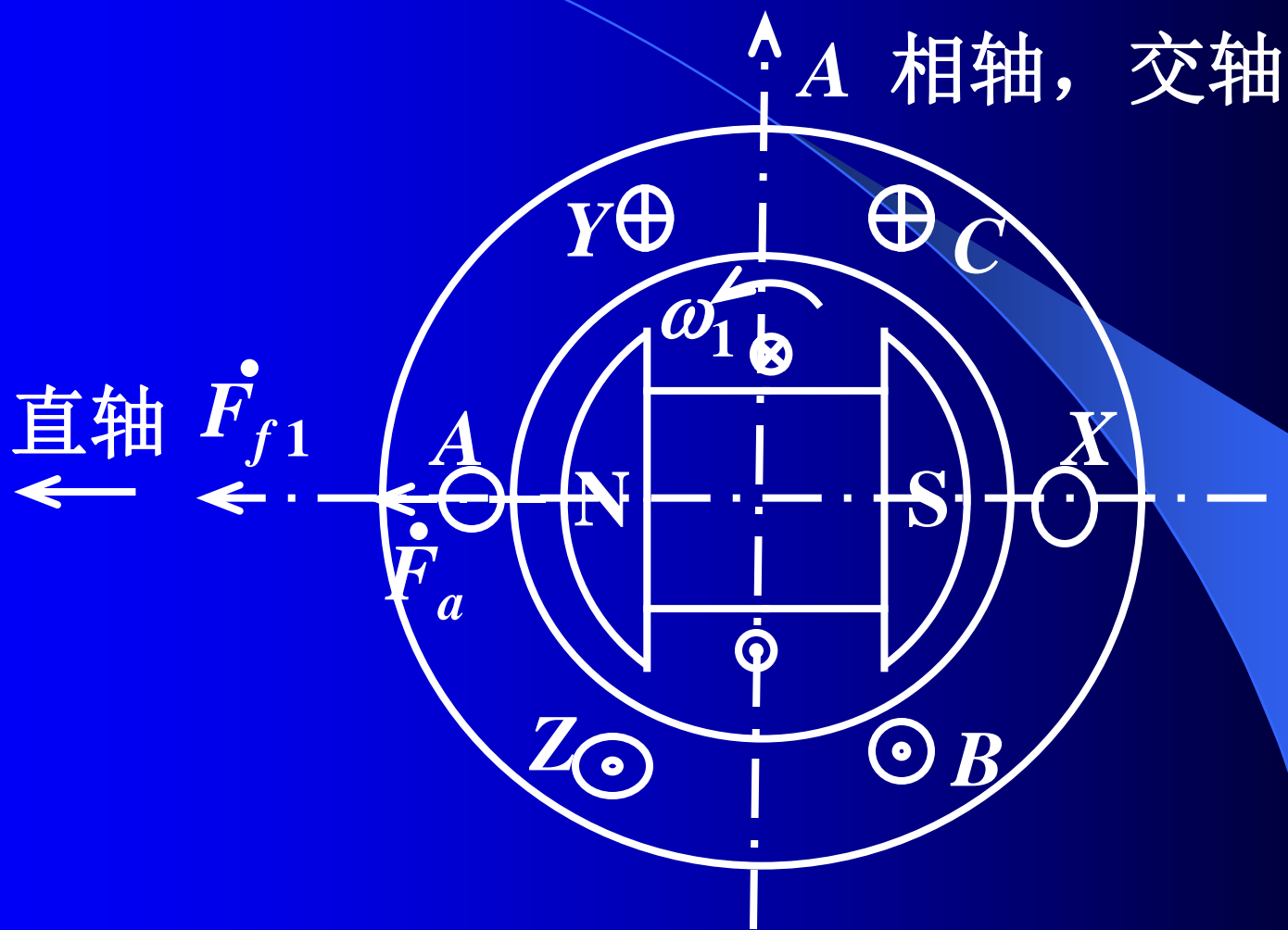


$\psi = \pi$  时的电枢反应

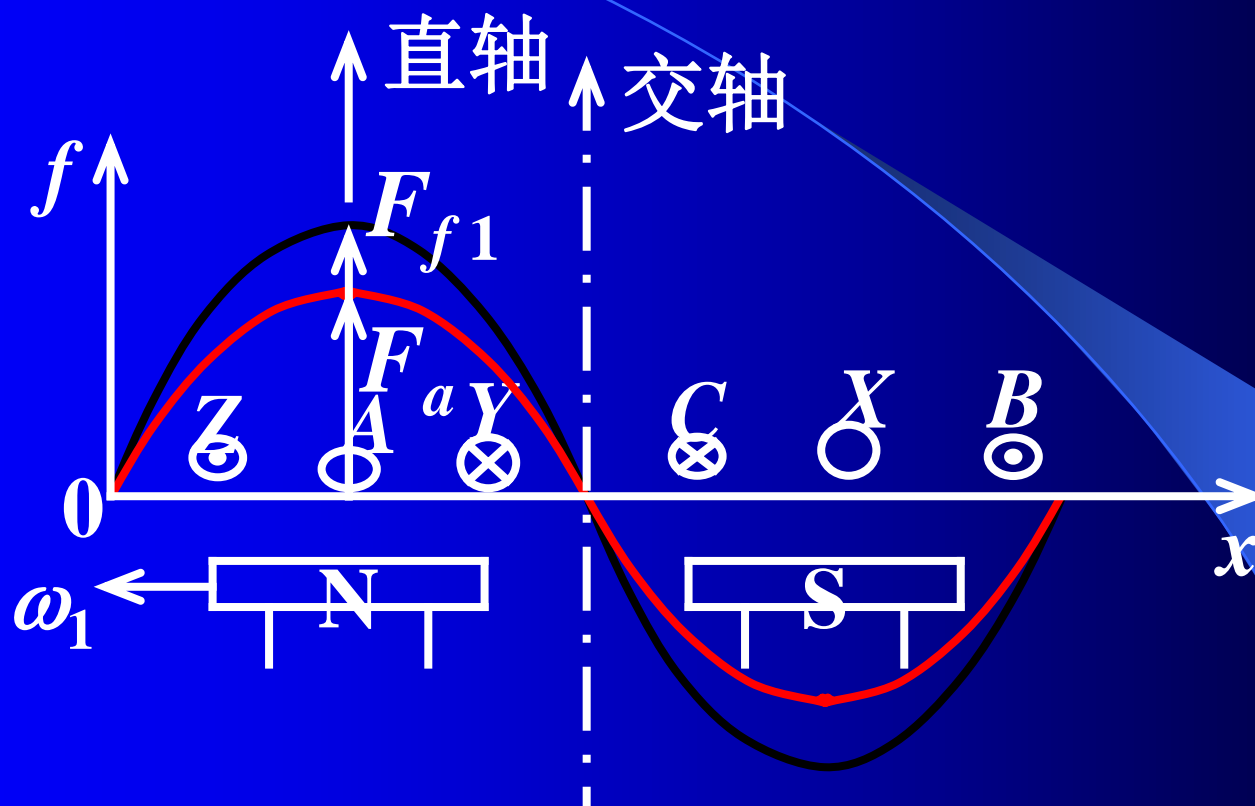
4)  $\psi = 90^\circ$  (超前),  $\cos\psi = 0$  的情况



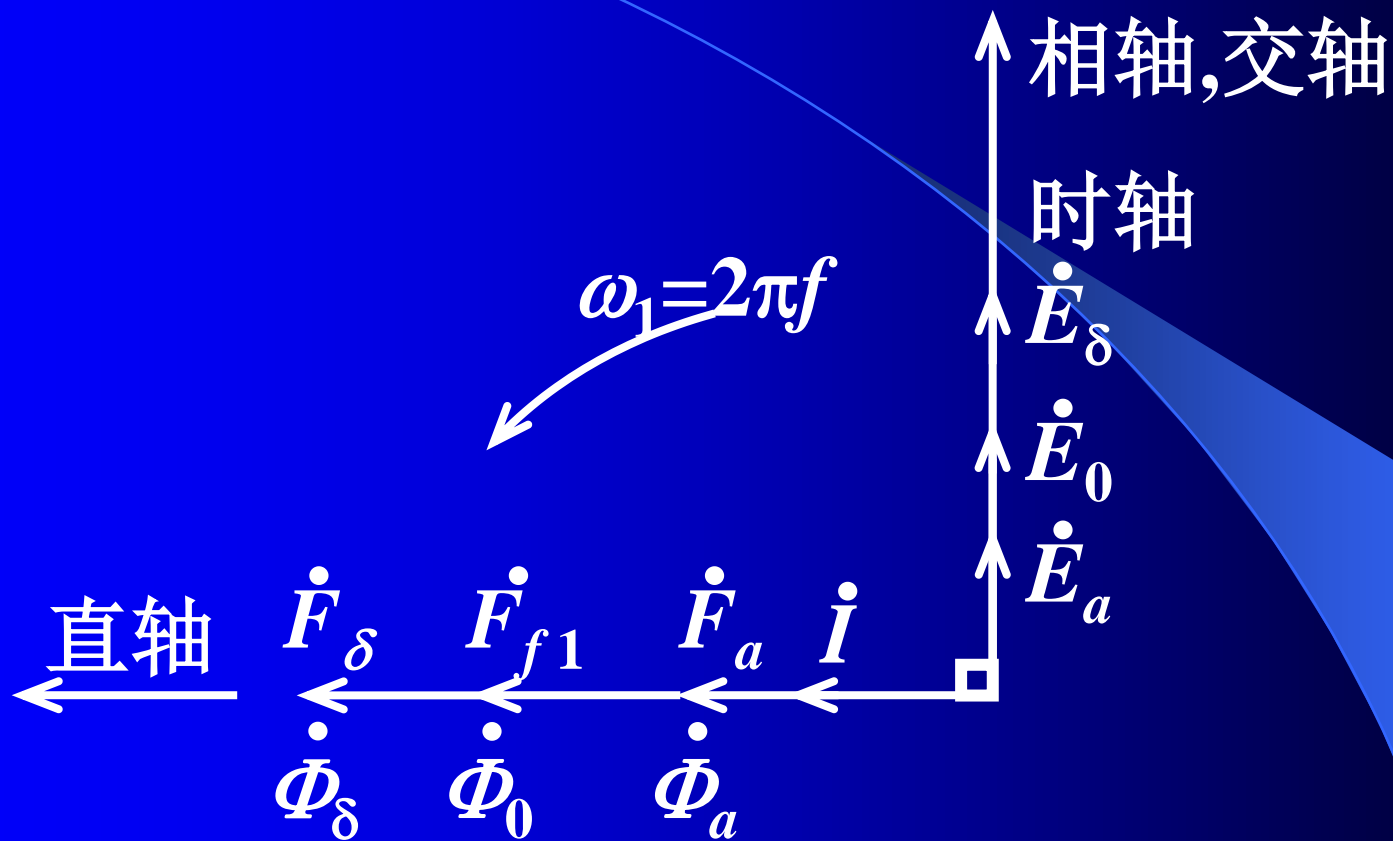
$\psi = -\pi/2$  时的电枢反应



$\psi = -\pi/2$  时的电枢反应



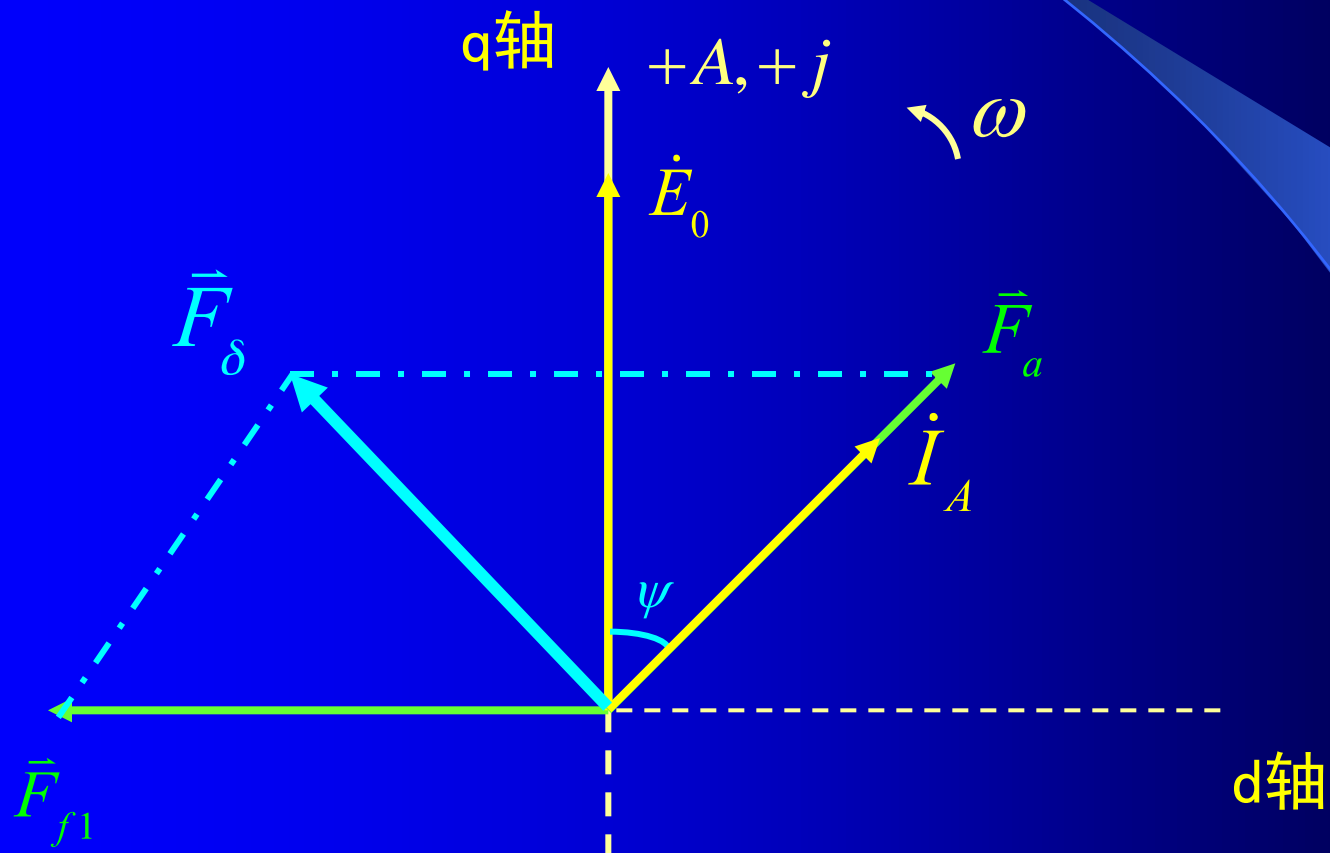
$\psi = -\pi/2$  时的电枢反应



$\psi = -\pi/2$  时的电枢反应

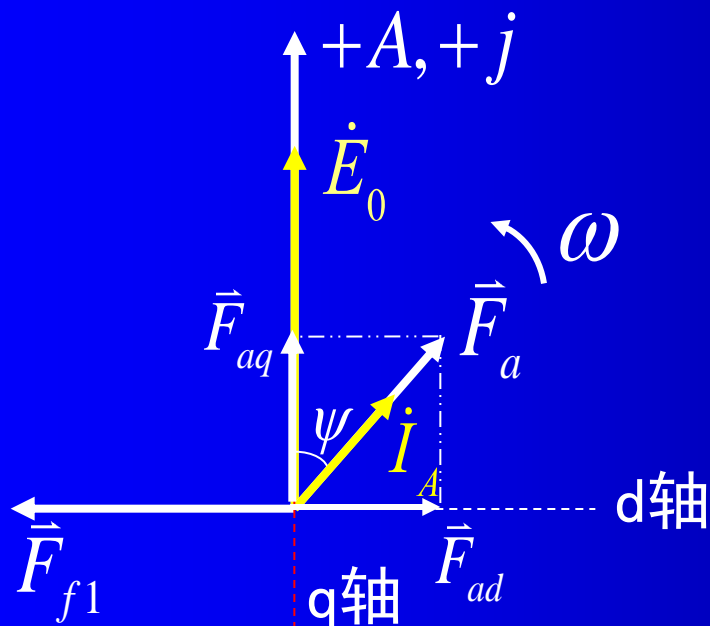
- 当电压保持不变，由于 $\vec{F}_a$ 的磁化作用，原有的直流激磁就嫌大了，必须相应减小
- 减小直流激磁后的同步电机处于欠激状态
- 结论：欠激的同步电机将输送电容性无功功率到电网

5)  $\psi$  为一个任意角



电枢反应磁动势  $\vec{F}_a$  可以分解为两个分量：

- (1) 直轴方向分量  $\vec{F}_{ad}$  对  $\vec{F}_{f1}$  起去磁或增磁作用；
- (2) 交轴方向分量  $\vec{F}_{aq}$  使合成磁动势  $\vec{F}_\delta$  与  $\vec{F}_{f1}$  产生夹角  $\theta'$ 。



$$\begin{cases} F_{ad} = F_a \cdot \sin\psi \\ F_{aq} = F_a \cdot \cos\psi \end{cases}$$



- 内功率因数角  $\psi$  为任意角度
  - 电枢磁势可分解为直轴和交轴两个分量
  - 交轴分量滞后于  $F_{f1}$ ，为发电机运行，超前于  $F_{f1}$  为电动机运行。它对应于输出和输入有功功率
  - 直轴分量可以是起磁化作用或去磁作用
  - 当直轴电枢磁势起去磁作用时，接在电网上的同步电机，不论它用作发电机或电动机，都系在过激状态。
  - 当直轴电枢磁势起磁化作用时，接在电网上的同步电机，不论它用作发电机或电动机，均系在欠激状态。

- 同步电机的运行方式可以由内功率因数角  $\psi$  来判断
  - 作发电机运行  $-\pi/2 < \psi < \pi/2$
  - 作电动机运行  $\pi/2 < \psi < 3\pi/2$
- 电枢反应的存在是实现能量传递的关键

## – 负载不同时的电枢反应

不同负载性质时，电枢磁场与转子电流产生电磁力（电磁转矩）的情况也不同

-  $\psi = 0$ 时

- 负载电流为交轴电流  $I_q$
- $I_q$  产生的交轴电枢反应磁场对转子电流产生电磁转矩与转子旋转方向相反
- 电机发出有功功率



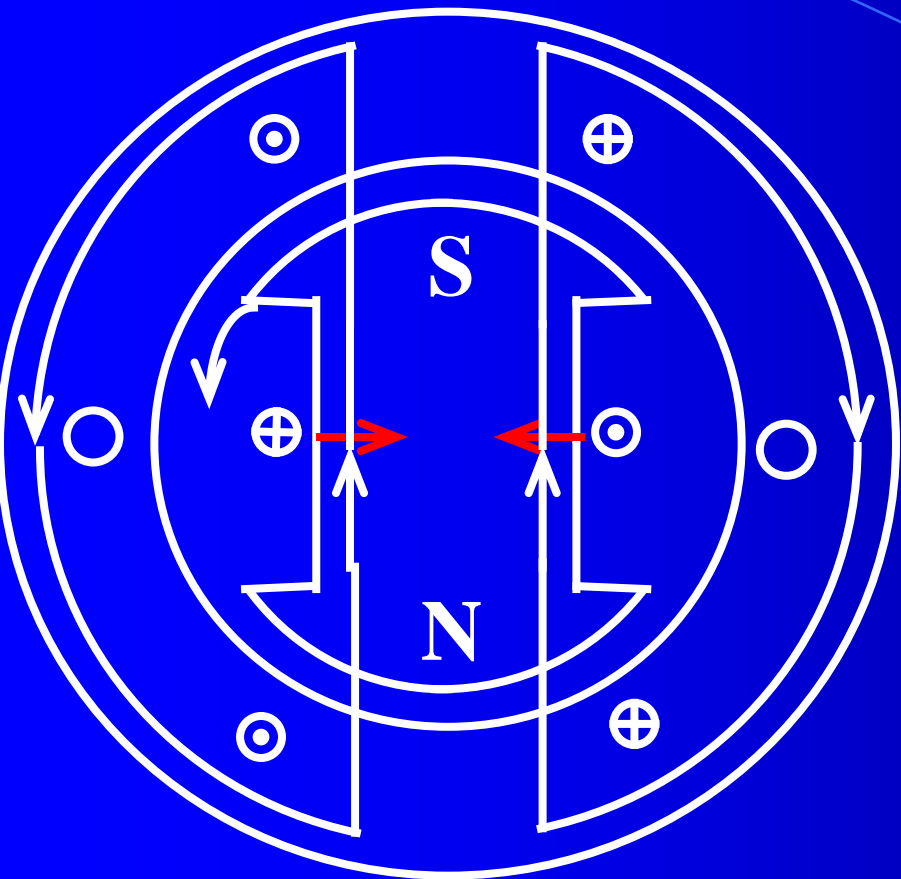
–  $\psi = \pm\pi/2$ 时

- 负载电流为直轴电流 $I_d$
- $I_d$ 产生的交轴电枢反应磁场对转子电流不产生电磁转矩
- 电机发出无功功率

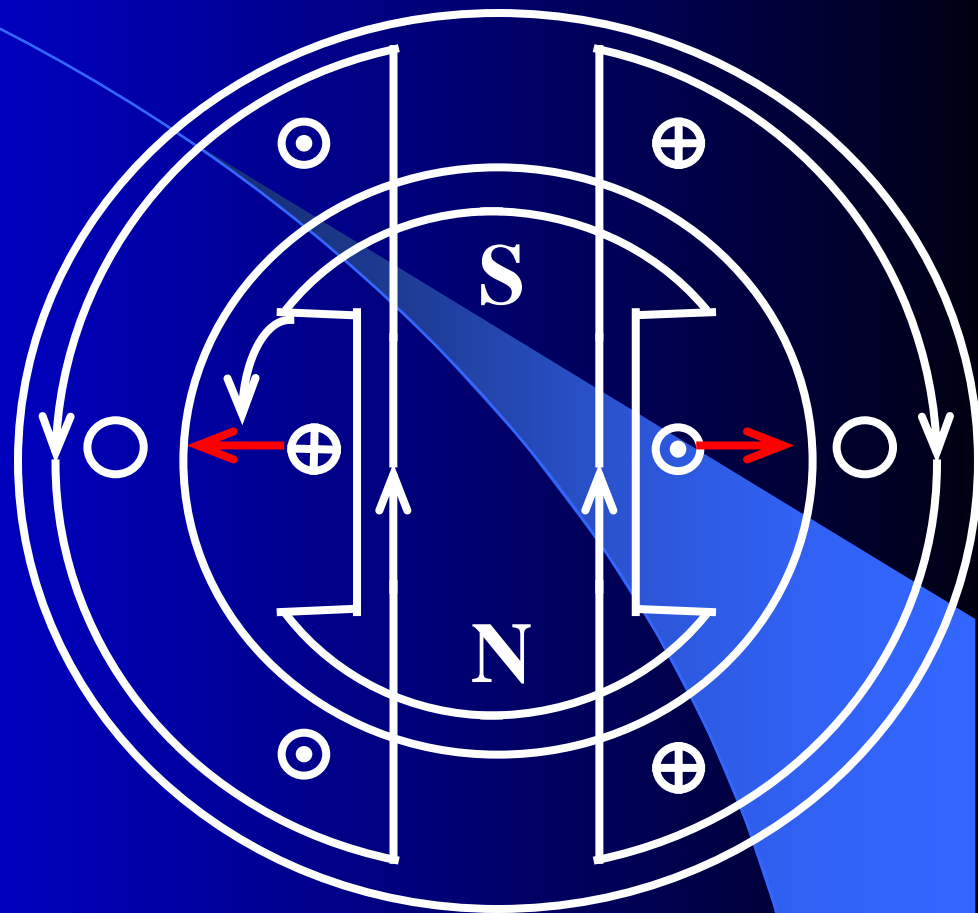
$\psi = +\pi/2$ , 发出感性无功

$\psi = -\pi/2$ , 发出容性无功

$\psi = 0$



$$\psi = +\pi/2$$



$$\psi = -\pi/2$$

- 综上所述

- 为了维持发电机的转速不变，必须随着有功负载的变化调节原动机的输入功率
- 为保持发电机的端电压不变，必须随着无功负载的变化相应地调节转子的激磁电流